

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

ALEŠ RICHTER



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie

Materiálové inženýrství

Elektromagnetické vlastnosti geopolymerů

Electromagnetic properties of geopolymers

Aleš Richter

KMT – B – 145

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant:

Ing. Martin Truhlář

Rozsah práce:

počet stran textu	45
počet obrázků	18
počet tabulek	37
počet grafů	18
počet příloh	1

Datum: 5. června 2009

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu

Studijní program: 2341 B – Strojírenství
Bakalář: Aleš Richter
Téma práce: Elektromagnetické vlastnosti geopolymerů
Electromagnetic properties of geopolymers
Číslo BP: KMT – B – 145
Vedoucí práce: Doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Konzultant: Ing. Martin Truhlář

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá elektromagnetickými vlastnostmi geopolymerů. Jsou to kompozity, které nejsou zcela známy a dosavadní výzkum byl zaměřen především na mechanické vlastnosti. Zkoumání chování geopolymerů v elektromagnetickém poli je původní, a proto v práci jsou uvedena pouze orientační měření možných elektrických parametrů a konstant. Tato práce má za cíl vymezit základní elektromagnetické vlastnosti geopolymerů a naznačit jejich případné uplatnění v elektrotechnice.

Úvodní část práce se zabývá přehledem všech možností měření, dále pak jejich postupným provedením a následným vyhodnocením a výpočtem materiálových konstant geopolymerů.

Závěrem práce je srovnání výsledků a doporučení vhodnosti k dalšímu použití z hlediska elektrotechniky.

Abstract:

Bachelor's thesis deals with electromagnetic properties of geopolymers. These composites are not fully known and the existing research has primarily focused on the mechanical properties. The verification of the geopolymers behavior in electromagnetic field is the original and therefore the work is only indicative measurement of electrical parameters. The aim is to define the basic electromagnetic properties of geopolymers and to suggest their possible application in electrical engineering.

The introduction of the work present all the possibilities of measurement methods and then it follows computing and evaluation of geopolymer material constants.

The conclusion is about comparison of the results and recommendations of the suitability for further use in terms of electrical engineering.

KLÍČOVÁ SLOVA

Geopolymer
Elektromagnetické vlastnosti
Uhlíkový geopolymer
Čedičový geopolymer
Skleněný geopolymer

KEY WORDS

Geopolymer
Electromagnetic properties
Carbon geopolymer
Basal geopolymer
Glass geopolymer

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná a že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že se na mou diplomovou práci plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 5.května 2009

.....

Podpis

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
1. ÚVOD.....	8
2. GEOPOLYMERY	9
2.1. Struktura geopolyméru a jeho materiálové složení	9
3. ZÁKLADNÍ OVĚŘENÍ VLIVU ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA GEOPOLYMERY	11
3.1. Příprava vzorků, výroba elektrod, rozměrové dispozice	11
3.2. Orientační měření magnetické konstanty – permeability	13
3.3. Vymezení rozsahů elektrických parametrů	13
4. MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ	14
4.1. Měření stejnosměrného odporu a elektrické pevnosti	14
4.2. Nízkofrekvenční měření od 100Hz do 100kHz	19
4.3. Měření na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru	25
4.4. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru stejnosměrným proudem	29
5. SHRUTÍ NAMĚŘENÝCH KONSTANT, CHYBY	32
6. ZÁVĚR	33
7. LITERATURA	34
8. PŘÍLOHY	35
8.1 Měření stejnosměrného odporu a elektrické pevnosti	35
8.2 Nízkofrekvenční měření od 100Hz do 100kHz	38
8.3 Měření na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru	39
8.4 Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru stejnosměrným proudem	39
8.5 Fotodokumentace	43

Přehled použitých symbolů a zkratk

Značka	Význam	Jednotka
VN	Vysoké napětí	[V]
VF	Vysokofrekvenční	[Hz]
C (CARBON)	Druh geopolyméru s uhlíkovými vlákny	[-]
BASAL	Druh geopolyméru s čedičovými vlákny	[-]
E-GLASS	Druh geopolyméru se skleněnými vlákny	[-]

Symbol	Význam	Jednotka
E	Yongův modul pružnosti	[Pa]
ρ	Hustota	[g/cm ³]
a, b, l, d	Rozměry vzorku	[m]
L	Indukčnost	[H]
R	Odpor	[Ω]
E_p	Elektrická pevnost	[V/m]
S	Plocha	[m ²]
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]
C	Kapacita	[F]
I	Elektrický proud	[A]
ε	Permitivita	[F/m]
δ	Ztrátový úhel	[°]
P	Elektrický výkon	[W]
$\tan \delta$	Činitel ztrát	[-]
R_0	Rezistivita	[Ωm]
U	Elektrické napětí	[V]
f	Frekvence	[Hz]
t	Teplota	[°C]

1. Úvod

Geopolymery jsou nové a pro mnohé neznámé materiály, o jejichž vzniku se začalo uvažovat po roce 1970. Tehdy Francii zachvátily mohutné požáry a bylo potřeba nalézt materiál, který se bude podobat plastům hustotou, pevností a cenou a zároveň bude nehořlavý a tepelně odolný.

V roce 1978 přichází Josef Davidovič s nápadem použít minerální chemie k výrobě minerálních pojiv a polymerů. Vznikly tak amorfni nebo částečně krystalické třídimenziální struktury hlinitokřemičitanu, nazvané "geopolymery".

Výhodou je, že tyto materiály polykondenzují při teplotě nižší než 150 °C. Jsou vhodné jako pojivo (speciální druhy betonu) nebo matrice kompozitu (výroba forem nástrojů) a nachází tak využití v mnoha oblastech průmyslu. Čistý materiál se pak používá například jako obaly ke skladování jedovatých chemikálií nebo radioaktivního odpadu.

Mez pevnosti v ohybu	130 [MPa]
Modul pružnosti	14 [GPa]
Hustota	1500 [kg/m ³]
Teplotní odolnost	1000 [°C]

Tab. 1.1. Základní obecné vlastnosti geopolymerních materiálů

Každý takovýto nový materiál s kvalitními mechanickými vlastnostmi je potřeba náležitě prozkoumat i v odvětvích jiných. Je pak možné, že se jeho použití více prohloubí objevem nových specifických vlastností nebo se naopak ukáže nevhodnost pro toto odvětví. Komplexnost všech parametrů materiálu pomůže najít nejvhodnější průmyslové využití. Tématem této práce je určitá část fyzikálních vlastností a to vlastností elektromagnetických.

Elektromagnetické konstanty, získané měřením geopolymérů, hodně napoví o jejich vhodnosti k dalšímu použití. Lze třeba zjistit, jestli se jedná o dobrý izolant nebo vodič, o dobrý kondenzátor, magnet atd. Pak by jeho vývoj mohl hodně znamenat i v elektrotechnice [3].

2. Geopolymery

Název geopolymerních materiálů byl navržen objeviteli, kteří vycházeli z hlinitokřemičitanu jako je polysialát (polysialate). Sialát je odvozen z oxidu hliníku a křemíku a je to část jeho polymerního řetězce.

Síť sialátů je složena z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 střídavě propojených atomem kyslíku. V síti musejí být přítomny ionty s kladnými náboji jako Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , aby kompenzovaly záporný náboj iontů Al^{3-} v tetraedrické koordinaci. Polysialáty vycházejí z tohoto empirického vzorce:



kde "w" je přirozené číslo, „M” stanoví jednomocný kation jako draslík nebo sodík, „n” je stupeň polymerizace [3].

2.1. Struktura geopolymery a jeho materiálové složení

Fyzikálně-chemická geopolymerní struktura je velmi variabilní v závislosti na poměru hlavních sloučenin, původu surovin a podmínek syntézy. Výzkum této oblasti je zatím na začátku [4].

Anorganické polymery mohou být syntetizované z různých hlinitokřemičitanů, jako je přirozeně se vyskytující metakaolin či vedlejší průmyslové výrobky např. popílek. Každá ze surovin má charakteristické minerální a fyzikální složení. [4]

Do geopolymerní matrice jsou jako výztuž přidávána určitá vlákna. V našem případě se jedná o skleněná, čedičová a uhlíková.

Skleněná vlákna

Používají se jako vyztužující prvek v kompozitech na bázi organických pryskyřic.

Vlastnosti :

- tuhost třetinová tuhosti oceli, $E = 80$ až 100 GPa,
- malá odolnost skleněných vláken vůči únavě,
- vysoká smáčivost, ale úprava povrchu lubrikací vede k snížení pevností vláken,
- hustota okolo $2,5 \text{ g / cm}^3$,
- tepelná vodivost o polovinu nižší než u ocelí
- tepelná roztažnost je poloviční proti tepelné roztažnosti oceli [5].

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou složena hlavně z uhlíku konkrétně z grafitické fáze. Atomy jsou ve dvoudimenzionálních hexagonálních vrstvách o délce zhruba 10nm tvoří svazky o tloušťce 10 nm. Uhlíková vlákna mají tvar válcový [6].

Vlastnosti :

- desetinásobná tuhost proti skleněným vláknům,
- pevnost při pokojové teplotě nižší než u skleněných vláken, ale s teplotou do 1000 °C se nemění, dokonce jsou i chemicky inertní,
- hustota 1,8 až 2 g/cm³, obsah čistého uhlíku 90 až 95 %,
- vynikající tepelné vlastnosti, pokud je chráníme před oxidací,
- minimální teplotní roztažnost,
- velká odolnost vůči únavě, ale malá odolnost vůči ostrým ohybům,
- elektrická vodivost,
- dvojnásobná cena proti skleněným vláknům, nejkvalitnější až 100x [6].

Čedičová vlákna

Čedič je hojně vyskytující se minerál v sopečných horninách. Používá se jako elektrický, tepelný a zvukový izolátor.

Vlastnosti:

- pevnost asi 1,4 GPa, E asi 70 GPa,
- hustota čedičových vláken 2,6 až 2,8 g/cm³ [6].

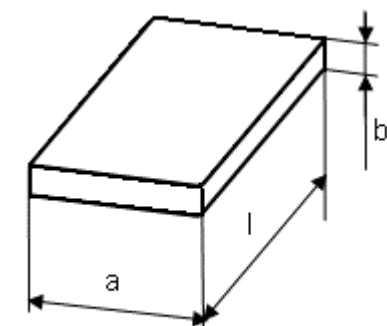
3. Základní ověření vlivu elektromagnetického pole na geopolymery

Geopolymery byly vyvíjeny tak, aby bylo dosaženo nejlepších mechanických a zároveň tepelných vlastností. Případné použití v elektrotechnice nebylo předpokládáno. Proto bylo nutné provést nejdříve základní experimenty, které by určily další postup. Měření byla pouze orientační a sloužila k vymezení dalších možností měření. Ukázala zhruba, jak se geopolymer chová v elektromagnetickém poli a z těchto výsledků jsme vyvodili, jakou metodou dále pokračovat.

3.1. Příprava vzorků, výroba elektrod, rozměrové dispozice

K měření jsem obdržel 2 sady vzorků. První byly tyčinkovité a jednalo se o 4 typy vzorků, další pak byly geometricky odlišné a jednalo se o 3 typy vzorků. Vzorek s matricí ARE-GLASS v 2. sadě chyběl, při výrobě se neosvědčil, tudíž ho nebylo třeba měřit. Druhá sada vzorků byla zhotovena s větší přesností přímo pro potřeby měření na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru. Hlavní rozměr, tloušťka, nesměl přesahovat 3mm a šířka musela být také optimální vzhledem k šířce elektrod přístroje. Pro ostatní přístroje a metody vzorky zcela vyhovovaly. Kvůli kvalitě obdržených vzorků přikládám větší důležitost 2. měření a výsledky 1. měření se objeví tabulkově a graficky pouze v příloze.

Vzhledem k tomu, že některé vzorky bylo třeba pokovit (toto si vyžadovaly všechny metody až na metodu vysokofrekvenčního analyzátoru, tam naopak nesměly být plochy vodivé), uvádím v tabulce funkční rozměry, které jsem používal k výpočtům a měřením a všechny vzorky čísloji, aby nedošlo k záměně. Dále je pak uvádím jen jejich zkratkou.



Obr.3.1. Geometrie vzorků

Název vzorku	rozměry [mm]		
	a	b	l
₁ C1	9,2	3,5	150,6
₁ C2	9	3,5	145,5
₁ E – GLASS1	4,76	4,7	68
₁ E – GLASS2	4,81	4,85	68
₁ ARE- GLASS1	4,6	4,6	66
₁ ARE- GLASS2	4,35	4,54	66
₁ BASAL1	4,59	4,7	69
₁ BASAL2	4,69	4,62	69

Tab. 3.1. Rozměry vzorků série 1

U první sady vzorků bylo pokovení provedeno elektricky vodivou pastou. Pasta měla označení „Silver-loaded elec conductive paint, 20gm“ a byla nesmývatelná. Zesílení rezistivity vzorku můžeme zanedbat, neboť stříbrná pasta zesiluje o 0.001Ω cm. Nasákavost geopolymérů negativně ovlivnila měření, vodivá pasta se pravděpodobně dostala do struktury vzorku a orientační měření potvrdilo výrazné snížení odporu [8].

U druhé sady vzorků jsem se snažil vyvarovat nasákavosti pasty do porézního geopolyméru tím, že jsem nepoužil vodivou pastu, ale tenkou fólii mědi, kterou jsem pomocí svěrek a izolačních destiček z plexiskla pevně uchytil k danému zkoumanému vzorku. Na měděný pásek jsem připájel vodivý kontakt. Rozměry vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.2.

U druhé sady vzorků uvádím obecné rozměry, každý vzorek ze série měl totožné hodnoty. V textu ale dále uvádím přesné označení ($_2E$ – GLASS 3, znamená vzorek z 2. série číslo 3 ze série E - GLASS), aby bylo patrné, který vzorek jsem měřil.

Název vzorku	rozměry [mm]		
	a	b	l
$_2C$	12	2	120
$_2E$ – GLASS	12	2.2	120
$_2BASAL$	12	2	120

Tab. 3.2. Rozměry vzorků série 2

Elektrody jsem tedy zhotovil buď z měděného nebo z mosazného plechu (mosazný byl použit jen pro teplotní namáhání), který jsem důkladně smrkem očistil a vodivost zlepšil omotáním pocínovaným měděným drátem. Ten jsem také použil při měření průraznosti materiálu vysokým napětím, když jsem z něho v předem dané vzdálenosti vytvořil elektrodu obklopující materiál. U elektrod jsem se snažil dosáhnout co nejmenšího přechodového odporu.

Všechna úvodní orientační měření jsem provedl pouze na vzorcích ze série 1 a tím vymezil okruh parametrů, které byly dále určující. Vzorky z kvalitnější série 2 jsem pak podrobil měření přesnějšímu a detailnějšímu.

3.2. Orientační měření magnetické konstanty – permeability

Základní magnetické vlastnosti jsem proměřil na přístroji TH2821 LCR METER. Jednalo se pouze o orientační měření, zda se materiál jeví jako magnetický. Byla použita dlouhá otevřená válcová cívka se vzduchovým jádrem o indukčnosti $L = 53 \mu\text{H}$. Postupně jsem vkládal jednotlivé materiály do dutiny cívky a měřil změnu indukčnosti. Nezaznamenal jsem žádnou. Žádný z tyčinkových vzorků výrazně nezesiloval ani nezeslaboval magnetické pole cívky. Geopolymery nejsou feromagnetické. Zařízení potřebné pro přesné měření magnetické konstanty není dostupné na TUL, proto můžeme pouze konstatovat, že geopolymery mohou být paramagnetické nebo diamagnetické. Pokles indukčnosti se vzrůstající frekvencí je dán rozptylem magnetického pole v otevřeném obvodu a odpovídá použité metodě měření.

f [Hz]	L [μH]
100	53
1000	50,5

Tab. 3.3. Závislost indukčnosti cívky s libovolným geopolimerem v jádře na frekvenci

3.3. Vymezení rozsahů elektrických parametrů

Resistivita

Orientační měření odporu jednotlivých materiálů jsem provedl na přístroji TH2821 LCR METER. Vzorky jsem připojil sériově k přístroji kleštinovými svorkami na vzdálenosti nejdelšího rozměru daného vzorku. Toto měření bylo jen předběžné a pomohlo určit, k čemu budou jednotlivé vzorky vhodné pro další měření.

Například vzorek z uhlíkových vláken se chová jako celkem dobrý vodič, a proto ho nemůžu změřit na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru, došlo by ke zkratu měřících elektrod. Naopak vzorky se skleněnými a čedičovými vlákny jsou vhodné pro toto měření.

Materiál	R [Ω]
C	0,2 Ω
E-GLASS	1,2M Ω
BASAL	130k Ω
ARE-GLASS	600k Ω

Tab. 3.4. Orientační měření ohmického odporu tyčinkových vzorků série 1

4. Měření elektrických parametrů

Měření probíhalo na několika typech přístrojů s odlišnou náročností obsluhy. Na začátku každého měření uvádím schéma zapojení nebo popis a jednoduchý návod. Je popsáno i označení jednotlivých přístrojů, pakliže nebudou obvyklé.

Pokud budou k jednotlivým měřením uvedeny grafy a tabulky, pak se jedná vždy pouze o měření druhých vzorků, jak již bylo popsáno. Výsledky prvního měření jsou v příloze, nicméně diskuze výsledků k danému měření je provedena i pro první měření.

Měření, která mohla ovlivnit strukturu a vlastnosti vzorků, byla provedena až jako poslední (měření elektrické pevnosti, teplotní namáhání).

4.1. Měření stejnosměrného odporu a elektrické pevnosti

Elektrická pevnost charakterizuje schopnost materiálu odolávat vysoko-napětovému zatížení. Je definována jako mezní intenzita elektrického pole, kterou materiál musí vydržet při cyklickém namáhání. Měření elektrické pevnosti jsem provedl na přístroji Hewlett Packard 4339B Digital High Resistance Meter. Přístroj sám byl zdrojem vysokého napětí. Jednalo se o jednoduché zapojení, vzorek se sériově připojil k přístroji. Měl jsem připraveny 4 vzorky pro 4 měření od každého typu 2 (E – GLASS, BASAL). Postupně a ve dvou navazujících cyklech (zvyšování, snižování napětí) jsem měřil průraznost ve vzdálenosti 10cm (tab. 4.1-2, 4.5-6) a 5 cm (tab. 4.3-4, 4.7-8). U žádného vzorku nedošlo k průrazu (proto $U_p > 1000V$).

Rozsahy přístroje: Napětí: 10V - 1kV
 Proud: 1mA – 10mA

Z každého měření spočítáme elektrickou pevnost ze vzorce:

$$E_p > \frac{U_p}{d} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4.1)$$

přičemž elektrická pevnost bude větší, protože napětí U_p k proražení materiálu bylo pokaždé větší než 1000V (d je vzdálenost elektrod).

Spočítáme taktéž měrný odpor ze vztahu:

$$R_0 = R \frac{S}{d} = R \frac{ab}{d} [\Omega m] \quad (4.2)$$

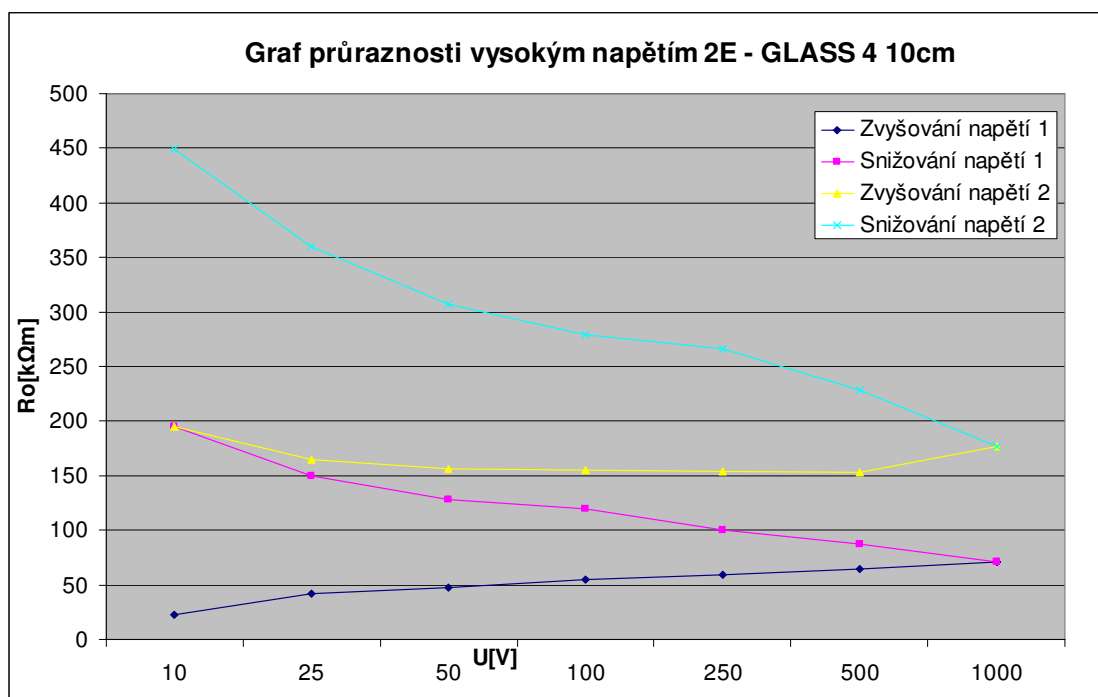
R je okamžitý odpor, S plocha průřezu vzorku a d vzdálenost mezi elektrodami.

U [V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	0,08	0,70	0,70	1,61
25	0,15	0,54	0,59	1,29
50	0,17	0,46	0,56	1,10
100	0,20	0,43	0,56	1,00
250	0,21	0,36	0,55	0,95
500	0,23	0,31	0,55	0,82
1000	0,26	0,26	0,63	0,63

Tab. 4.1. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů
při vysokém napětí ($_2$ E-GLASS 4 vzdálenost elektrod d=10cm)

U[V]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]
10	23	195	195	450
25	42	150	165	360
50	47	129	156	307
100	55	119	155	279
250	60	101	154	266
500	64	87	153	228
1000	72	72	177	177

Tab. 4.2. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém
napětí ($_2$ E-GLASS 4 vzdálenost elektrod d=10cm)



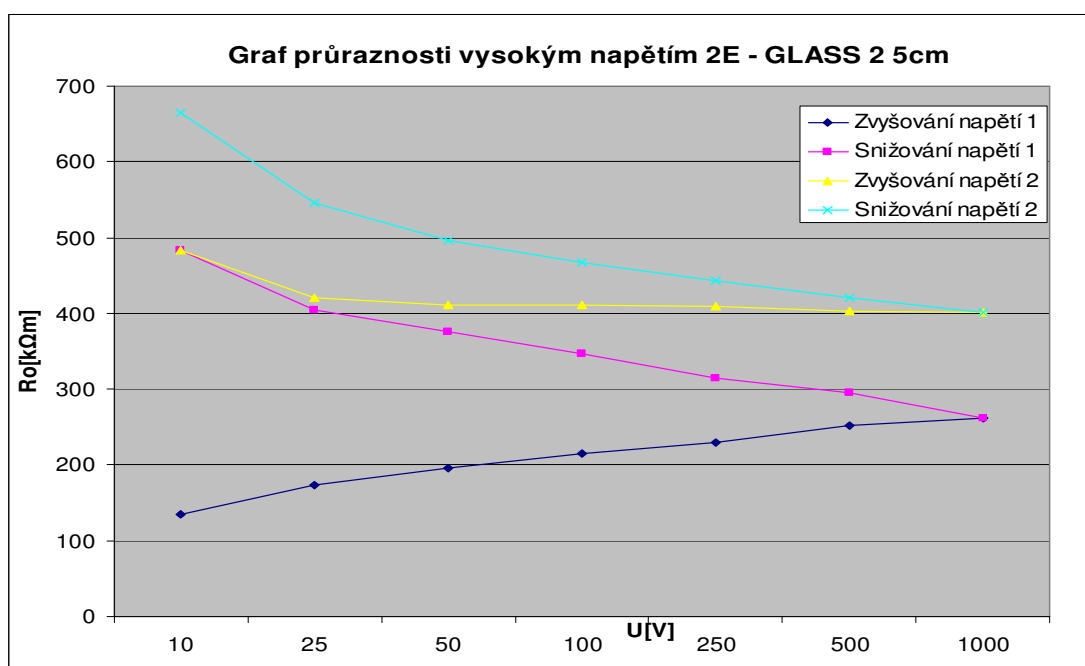
Elektrická pevnost ($_2\text{E-GLASS 4 d=10cm}$) $E_p > 10 \frac{kV}{m}$.

U [V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	0,24	0,86	0,86	1,19
25	0,30	0,72	0,75	0,98
50	0,35	0,67	0,73	0,89
100	0,39	0,62	0,74	0,84
250	0,41	0,56	0,73	0,79
500	0,45	0,53	0,72	0,75
1000	0,47	0,47	0,72	0,72

Tab. 4.3. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů při vysokém napětí ($_2\text{E-GLASS 2}$ vzdálenost elektrod d=5cm)

U [V]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]
10	134	482	482	664
25	172	404	420	545
50	195	375	411	496
100	215	347	411	466
250	230	314	409	443
500	252	295	402	420
1000	260	260	401	401

Tab. 4.4. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém napětí ($_2\text{E-GLASS 2}$ vzdálenost elektrod d=5cm)



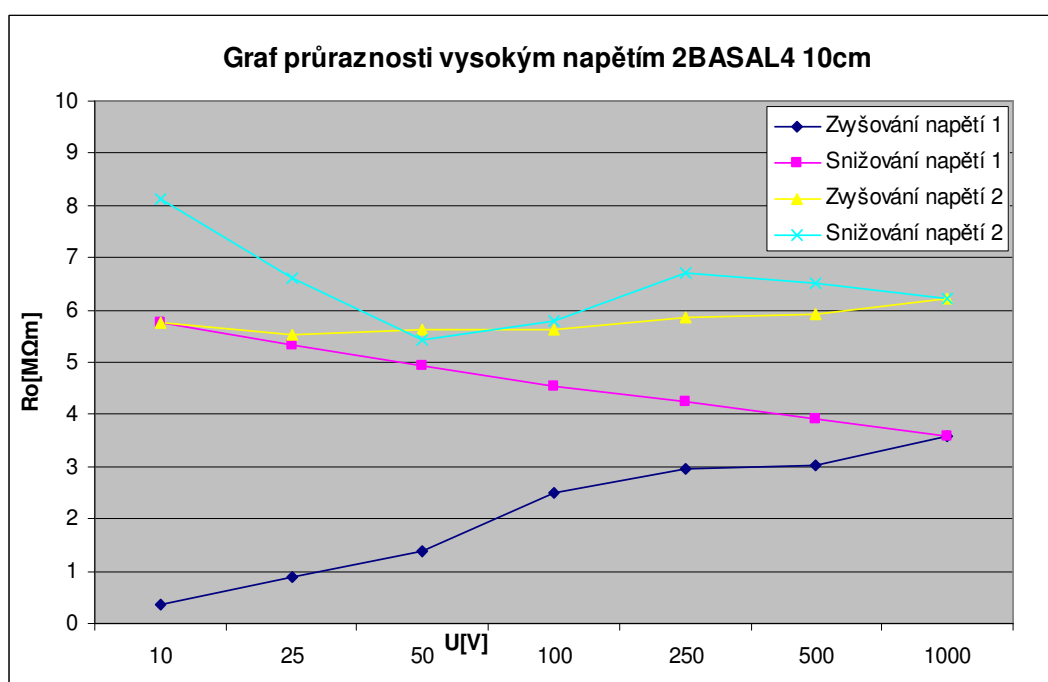
Elektrická pevnost ($_2$ E-GLASS 2 d=5cm) $E_p > 20 \frac{kV}{m}$.

U[V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	1,42	22,6	22,6	32,0
25	3,52	21,0	21,8	26,0
50	5,41	19,4	22,1	21,4
100	9,86	17,9	22,2	22,8
250	11,60	16,7	23,0	26,4
500	11,90	15,4	23,3	25,6
1000	14,10	14,1	24,5	24,5

Tab. 4.5. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů při vysokém napětí ($_2$ BASAL 4 vzdálenost elektrod d=10cm)

U [V]	R _o [MΩm]	R _o [MΩm]	R _o [MΩm]	R _o [MΩm]
10	0,36	5,74	5,74	8,13
25	0,89	5,33	5,53	6,60
50	1,37	4,92	5,61	5,44
100	2,50	4,55	5,63	5,79
250	2,94	4,24	5,84	6,70
500	3,02	3,91	5,91	6,50
1000	3,58	3,58	6,22	6,22

Tab. 4.6. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém napětí ($_2$ BASAL 4 vzdálenost elektrod d=10cm)



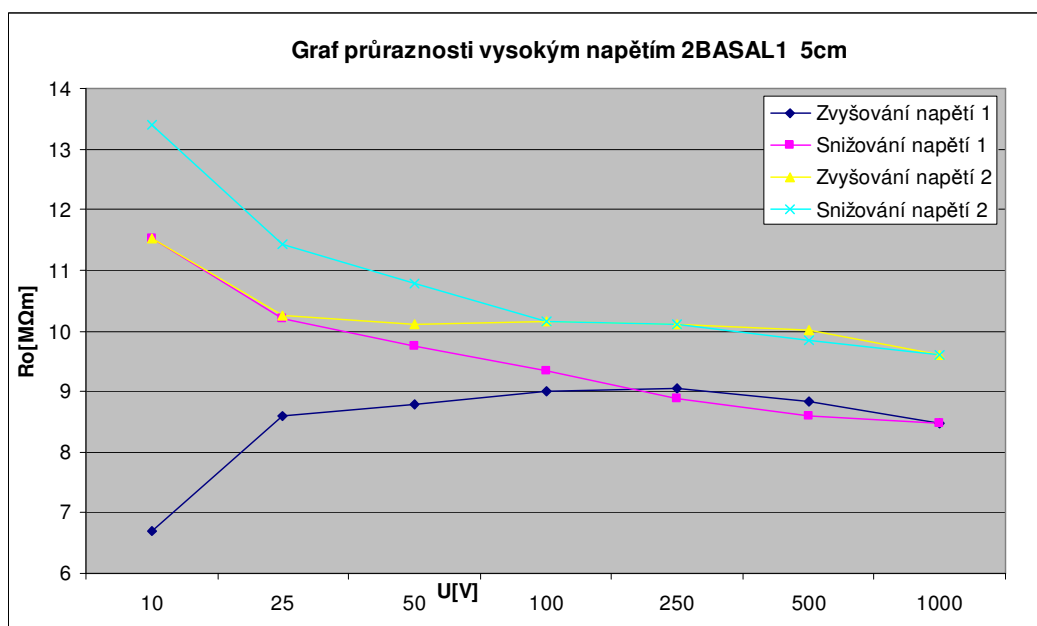
Elektrická pevnost ($_2$ BASAL4 $d=10\text{cm}$) $E_p > 10 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.

U [V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	13,2	22,7	22,7	26,4
25	16,9	20,1	20,2	22,5
50	17,3	19,2	19,9	21,2
100	17,7	18,4	20,0	20,0
250	17,8	17,5	19,9	19,9
500	17,4	16,9	19,7	19,4
1000	16,7	16,7	18,9	18,9

Tab. 4.7. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů při vysokém napětí ($_2$ BASAL 1 vzdálenost elektrod $d=5\text{cm}$)

U [V]	R_o [MΩm]	R_o [MΩm]	R_o [MΩm]	R_o [MΩm]
10	6,70	11,53	11,53	13,41
25	8,58	10,21	10,26	11,43
50	8,78	9,75	10,10	10,76
100	8,99	9,34	10,16	10,16
250	9,04	8,89	10,10	10,10
500	8,83	8,58	10,00	9,85
1000	8,48	8,48	9,60	9,60

Tab. 4.8. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém napětí ($_2$ BASAL 1 vzdálenost elektrod $d=5\text{cm}$)



$$\text{Elektrická pevnost (}_2\text{BASAL1 } d=5\text{cm)} \quad E_p > 20 \frac{kV}{m}$$

Závěr:

Měření bylo provedeno s konstantní vzdáleností elektrod (5 a 10cm), měřicí přístroj měl proudové omezení. Proto nebylo možné dostat se na maximální hodnoty napětí. Výsledkem je pak nerovnost, která říká, že daný materiál má elektrickou pevnost větší než dovolila měřicí metoda.

Při měření průraznosti materiálu docházelo ke změně struktury uvnitř materiálu - jakémusi vypálení. Čím vyšší bylo napětí nebo čím delší bylo setrvání pod napětím, tím větší byl pak odpor. Dokonce při menší vzdálenosti elektrod byla větší rezistivita. Tento jev zřejmě nastal v důsledku většího namáhání napětím na menší části vzorku.

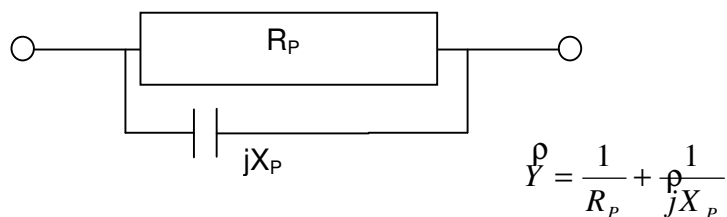
Zde bych také rád poukázal na nehomogenitu geopolyméru. U první sady vzorků se prorazil materiál už při 250, 500V, což se u druhé nepovedlo ani při 1000V. Z druhé sady vzorků vyšla elektrická pevnost $E_p > 20kV / m$.

Vzhledem k elektrické pevnosti vzduchu, která je zhruba $2260kV / m$ a vzhledem k výsledkům série 1, není E-GLASS a BASAL dostatečně elektricky pevný. Dobrý izolant má elektrickou pevnost 1000x větší. Rezistivita R_0 je u čedičového kompozitu o řád větší než u skleněného. Stále se o nich ale nedá mluvit jako o dobrých izolantech. Dobrý izolant má rezistivitu 1000x větší. Možný způsob, jak by toho šlo dosáhnout, je povlakování vzorků [7].

4.2. Nízkofrekvenční měření od 100Hz do 100kHz

Nízkofrekvenční měření jsem provedl na analyzátoru, přístroji HP 4263B LCR METER. Měřil jsem celkem 6 vzorků - od každého dva kvůli porovnání. Vzorky skleněné a čedičové byly pokryty měděnou fólií (viz příprava vzorku) a vzorky uhlíkové taktéž měděnou fólií, která byla potažena izolantem. To bylo nutné kvůli dobré vodivosti uhlíku.

Vzorky obou sérií jsem připojil sériově k přístroji přes měděné elektrody, ale měření se provádělo v doporučeném paralelním schématu zapojení. Volbu nastavení paralelních údajů zobrazí přímo LCR METER. Pro různé frekvence jsem měřil hodnoty C_p a R_p .



Obr. 4.1. Schéma paralelního zapojení

R_p je paralelní odpor, X_p kapacita, j imaginární složka, $Y=1/Z$ admitance.

Rezistivitu, permitivitu a ztrátový úhel δ musíme pak dopočítat pomocí vzorců vzhledem k paralelnímu schématu zapojení, jejich hodnoty uvádím v tabulkách a grafech:

$$\text{Rezistivita: } R_0 = R_p \frac{al}{b} [\Omega m] \quad (4.3)$$

$$\text{Permitivita: naměřená } \varepsilon = C_p \frac{b}{la} [F / m] \quad (4.4)$$

$$\text{vakua } \varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [F / m] \quad (4.5)$$

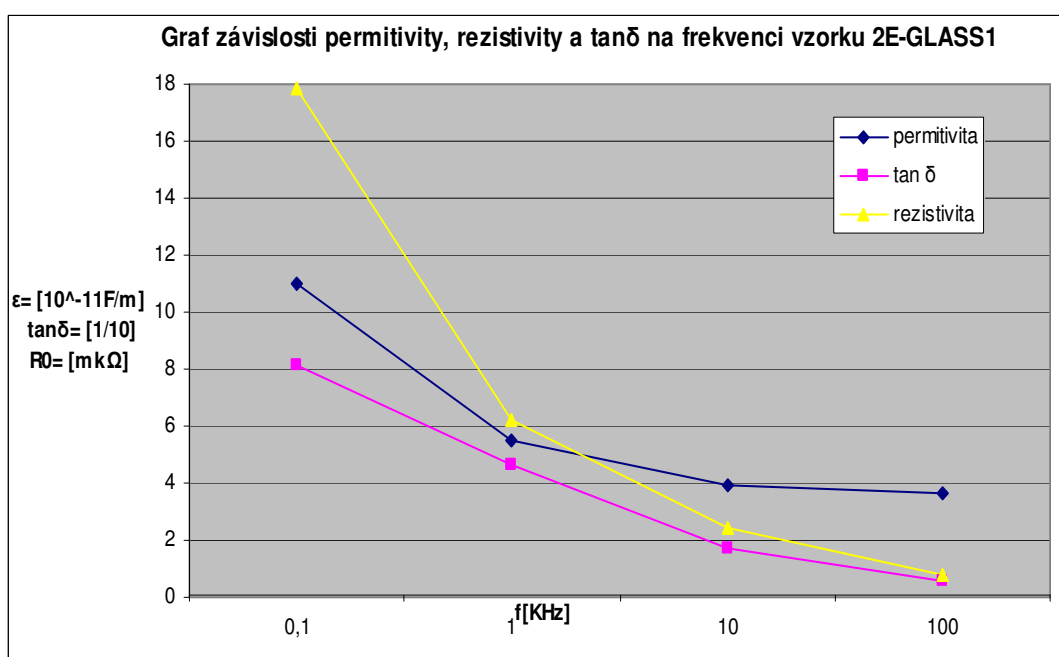
$$\text{relativní } \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} [-] \quad (4.6)$$

$$\text{Činitel ztrát: } \tan \delta = (\omega C_p R_p)^{-1} = (2 f \pi C_p R_p)^{-1} \quad (4.7)$$

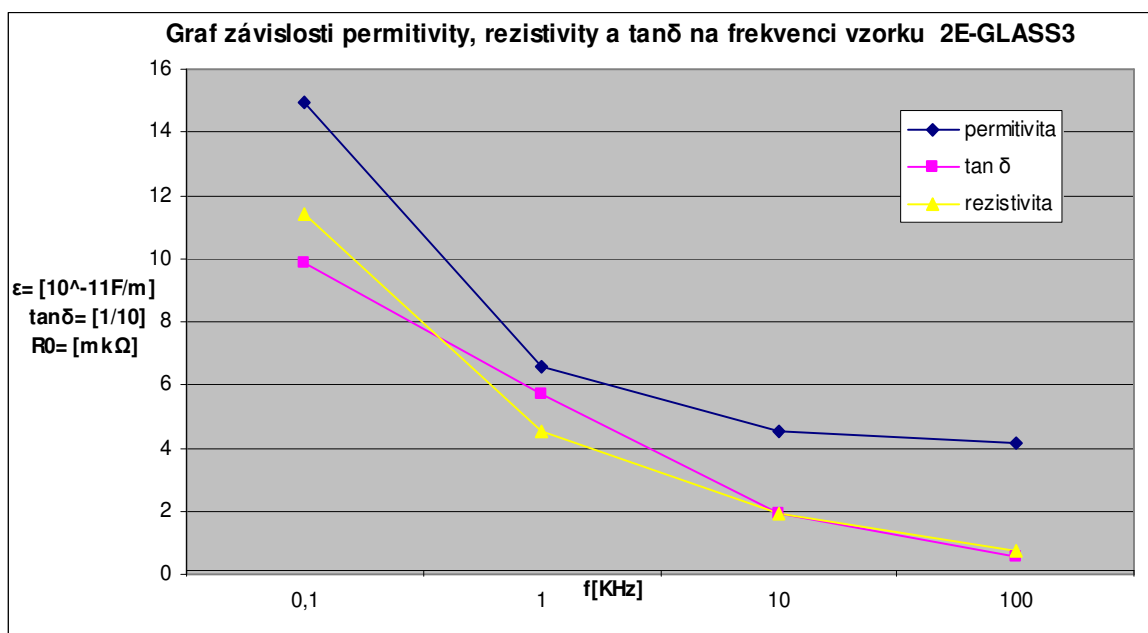
$$\text{Ztrátový úhel: } \delta = \arctan(2 f \pi C_p R_p)^{-1} \quad (4.8)$$

C_p [pF]	R_p [MΩ]	f [kHz]	R_0 [m*kΩ]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
76,00	25,74	0,1	17,83	1,10E-10	12	0,814	39,2
38,33	8,98	1	6,22	5,53E-11	6	0,463	24,8
27,17	3,47	10	2,40	3,92E-11	4	0,169	9,6
25,10	1,10	100	0,76	3,62E-11	4	0,058	3,3

Tab. 4.9. Nízkofrekvenční charakteristika ${}_2E$ - GLASS1

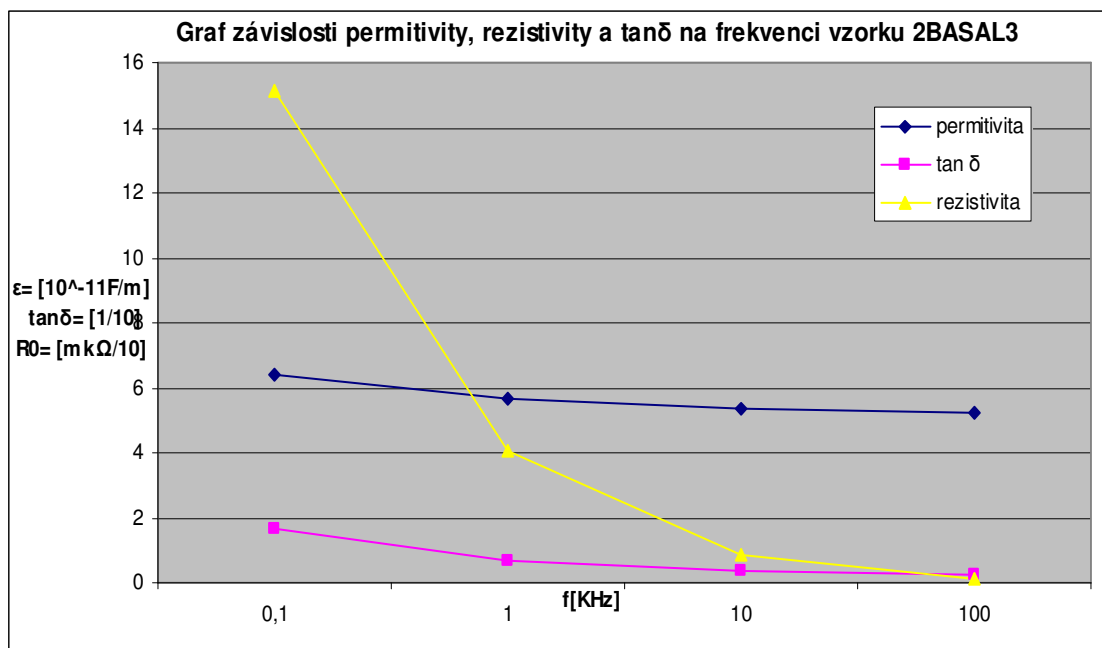


C_p [pF]	R_p [M Ω]	f [kHz]	R_0 [m \cdot k Ω]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
98,00	16,50	0,1	11,43	1,50E-10	17	0,985	44,6
42,84	6,54	1	4,53	6,55E-11	7	0,568	29,6
29,78	2,79	10	1,93	4,55E-11	5	0,192	10,9
27,33	1,08	100	0,75	4,18E-11	5	0,054	3,1

Tab. 4.10. Nízkofrekvenční charakteristika ${}_2E$ – GLASS3

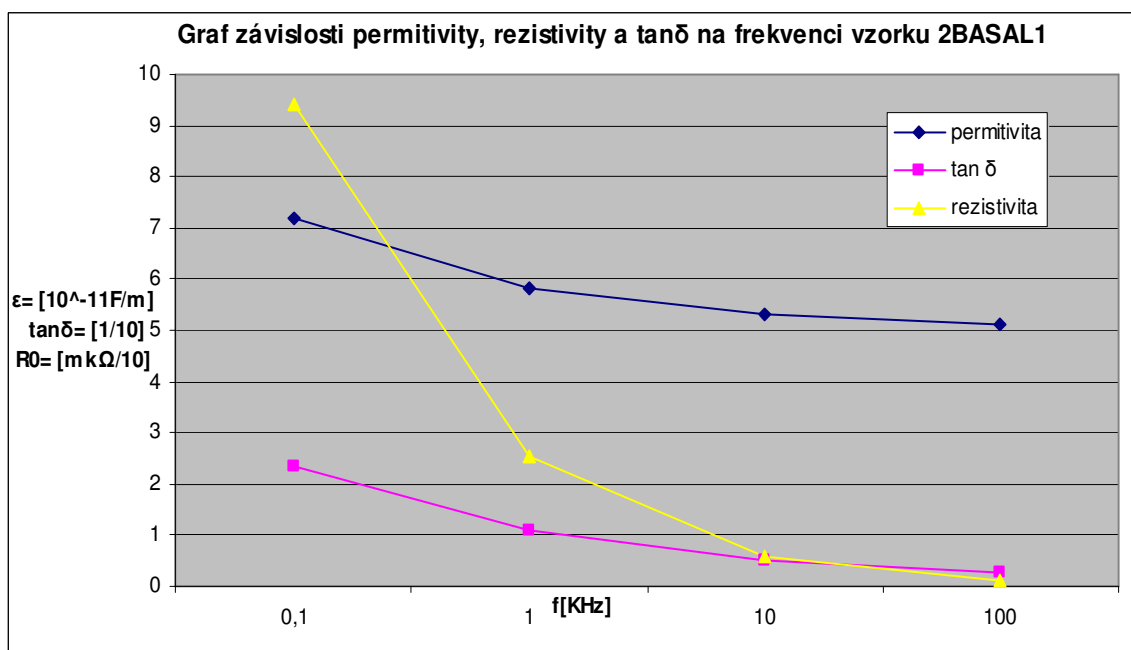
C_p [pF]	R_p [M Ω]	f [kHz]	R_0 [m \cdot k Ω]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
46,30	210,46	0,1	151,53	6,43E-11	7	0,163	9,3
40,80	56,25	1	40,50	5,67E-11	6	0,069	4,0
38,41	11,84	10	8,52	5,33E-11	6	0,035	2,0
37,58	1,96	100	1,41	5,22E-11	6	0,022	1,2

Tab. 4.11. Nízkofrekvenční charakteristika ${}_2BASAL3$



C _p [pF]	R _p [MΩ]	f [kHz]	R ₀ [m*kΩ]	ε [F/m]	ε _r [-]	tan δ	δ [°]
51,70	131,00	0,1	94,32	7,18E-11	8	0,235	13,2
41,96	35,00	1	25,20	5,83E-11	7	0,108	6,2
38,32	8,00	10	5,76	5,32E-11	6	0,052	3,0
36,80	1,68	100	1,21	5,11E-11	6	0,026	1,5

Tab. 4.12. Nízkofrekvenční charakteristika 2BASAL1



Kvůli dobré vodivosti uhlíku jsem kapacitu a odpor uhlíkových geopolymérů nemohl měřit stejně jako u předcházejících vzorků. Musel jsem jako izolant vložit slabou vrstvičku folie mezi elektrody a měřený materiál.

Užití této metody jsem musel přizpůsobit výpočty kapacity. Počínal jsem si jako při sériovém zapojení 3 kondenzátorů, z nichž 2 byly izolované měděné plechy a třetí zkoušený uhlíkový geopolymér. Musel jsem změřit celkovou zapojenou kapacitu i samostatné fólie, abych pak mohl získat neznámou kapacitu uhlíkového geopolyméru.

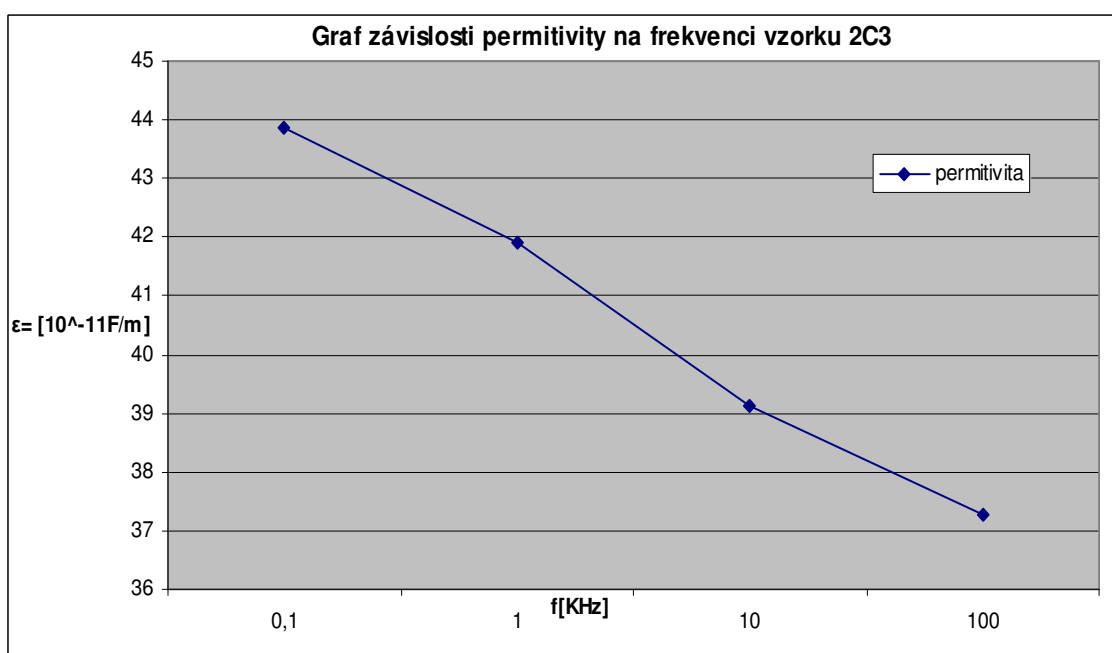
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_F} + \frac{1}{C_C} \quad (4.9)$$

$$C_C = \frac{CC_F}{C_F - C} \quad (4.10)$$

C je celková kapacita sériově zapojených kondenzátorů, C_F je kapacita fólie a C_C kapacita uhlíkového geopolyméru. C_C dosadíme do rovnice (4.4) a vypočítáme permitivitu.

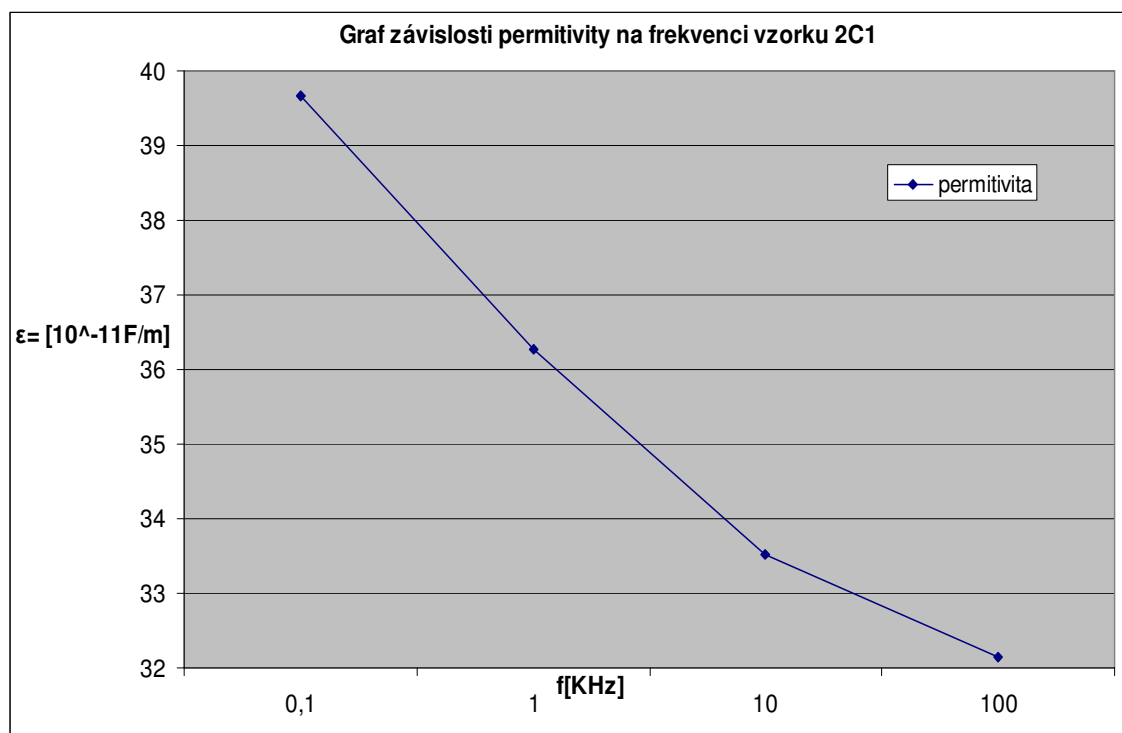
C [pF]	C_F [pF]	f [kHz]	C_C [pF]	ϵ [F/m]	ϵ_r [-]
137	242	0,1	316	4,39E-10	50
134	241	1	302	4,19E-10	47
129	238	10	282	3,91E-10	44
125	234	100	268	3,73E-10	42

Tab. 4.13. Nízkofrekvenční charakteristika $_{2C3}$



C [pF]	C _F [pF]	f [kHz]	C _C [pF]	ε [F/m]	ε _r [-]
122	213	0,1	286	3,97E-10	45
117	212	1	261	3,63E-10	41
112	209	10	241	3,35E-10	38
109	206	100	231	3,22E-10	36

Tab. 4.14. Nízkofrekvenční charakteristika 2C1

**Závěr:**

Nízkofrekvenční měření potvrdilo, že struktura geopolyméru je hodně ovlivňována vnějším střídavým polem. Amplituda měřeného signálu byla 1V, což je relativně silný signál, který vyvolá velkou vnitřní polarizaci. Sklo s čedičem jsou poměrně stálé materiály i při vysokých frekvencích, z toho lze soudit, že polarizační ztráty způsobuje především pojivo. Molekuly silikátů s ionty OH⁻ mají pravděpodobně i špatné elektrodynamické vlastnosti.

Relativní permitivita vzorků E-GLASS a BASAL odpovídá běžným izolačním materiálům.

4.3. Měření na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru

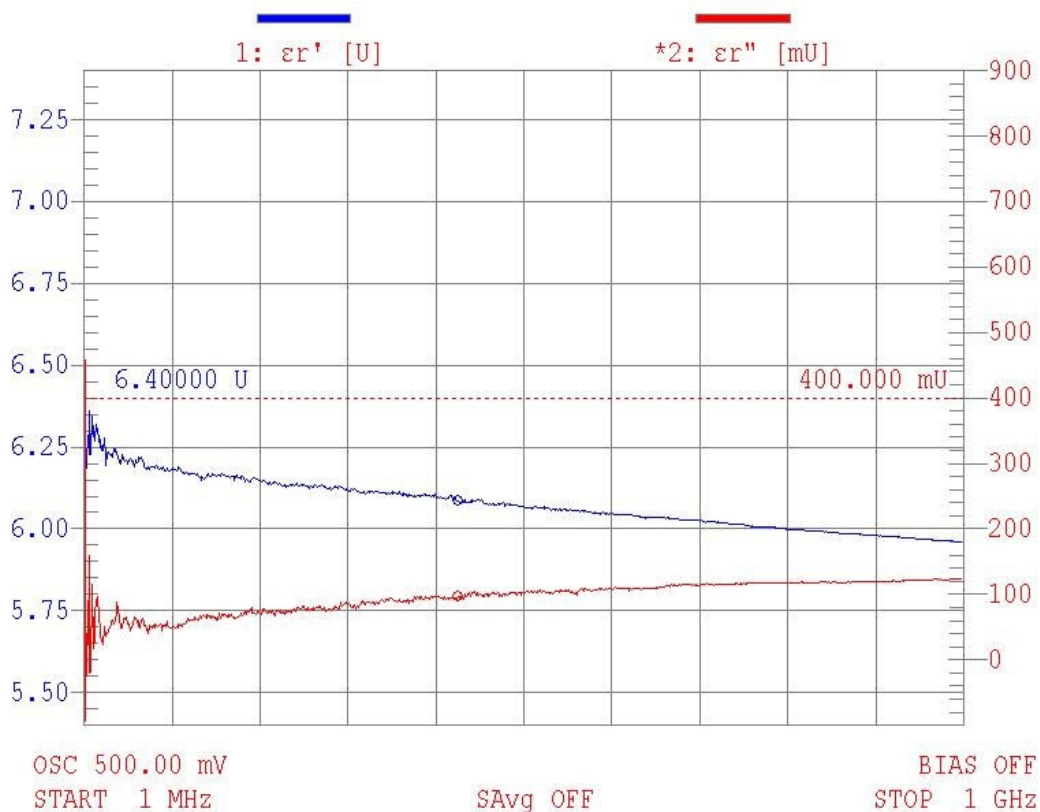
Měření vysoké frekvence od 1MHz do 1GHz jsem provedl pomocí přístroje AGILENT E4991A RF IMPEDANCE/ MATERIAL ANALYZER. Jednotlivé vzorky jsem postupně upínal mezi hroty přístroje. Tloušťka materiálu nesměla přesahovat 3mm, šířka a délka vzorku měla být taková, aby přesahovala průřez válcovitých upínek. Všechno bylo splněno, jelikož série druhých vzorků byla speciálně rozměrově navržena právě pro tuto metodu měření.

Samotné měření netrvalo dlouho, přístroj byl zcela automatizován a byl schopen ukládat data z měření. Ovšem nastavení přístroje nebylo tak snadné. Nebudu ho zde popisovat, podrobný návod lze stáhnout na internetových stránkách uvedených v literatuře [10]. S obsluhou mi z velké části pomohl konzultant ing. Martin Truhlář.

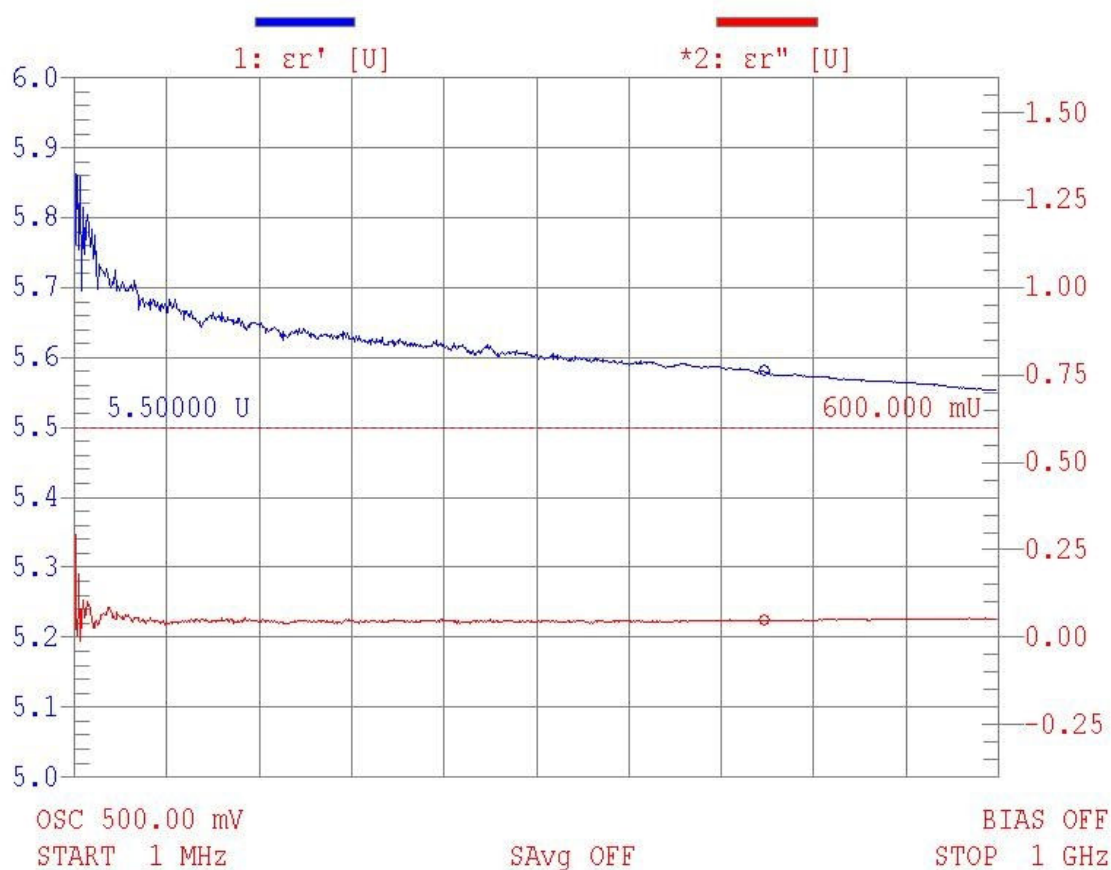
Výstup měření jsem si nastavil jako ϵ' (reálná složka permitivity) a ϵ'' (imaginární složka permitivity). Činitel ztráty a ztrátový úhel pak vypočítáme ze vzorce:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \rightarrow \delta = \arctan \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.11)$$

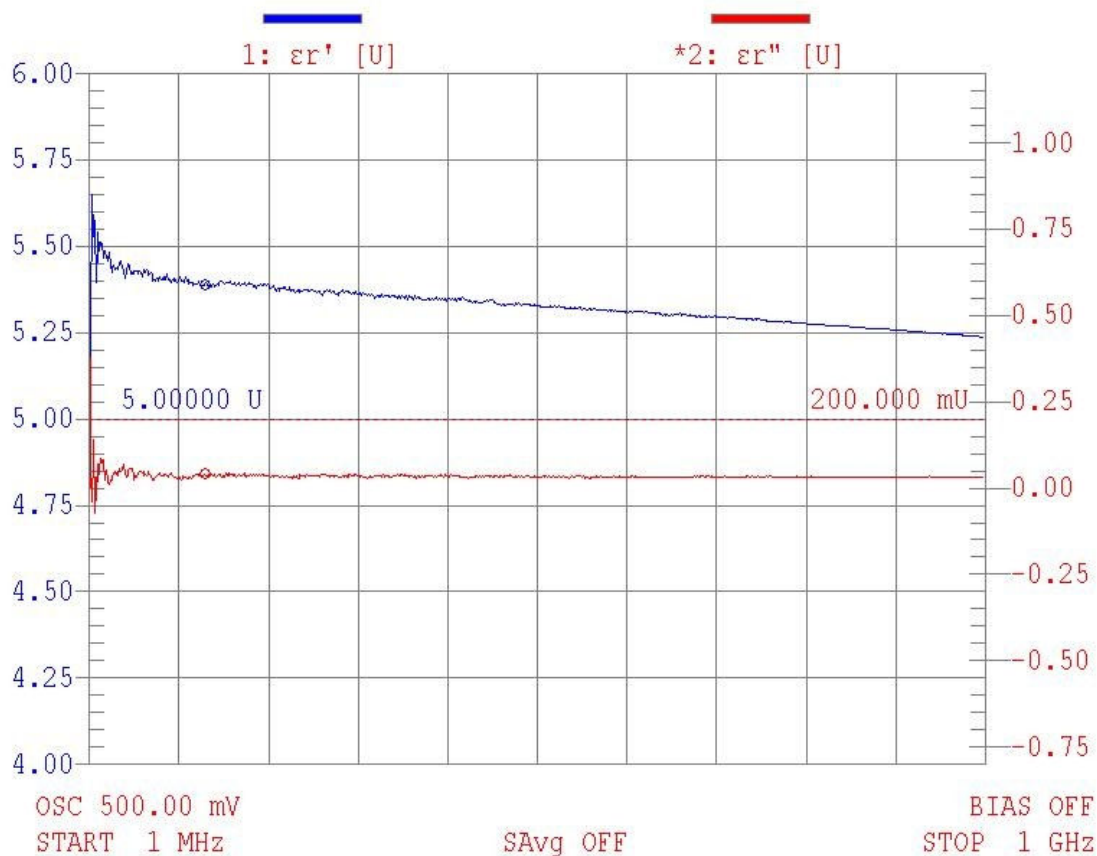
Jelikož se jedná o poměrně velké množství dat (801 hodnot pro každý rozsah frekvence 1MHz – 1GHz), uvádím výstupy v grafické podobě, jak je zobrazil analyzátor a další výsledky jsou pak v příloze. Zároveň doplňuji jednoduchou tabulkou pro srovnání a představu [10].



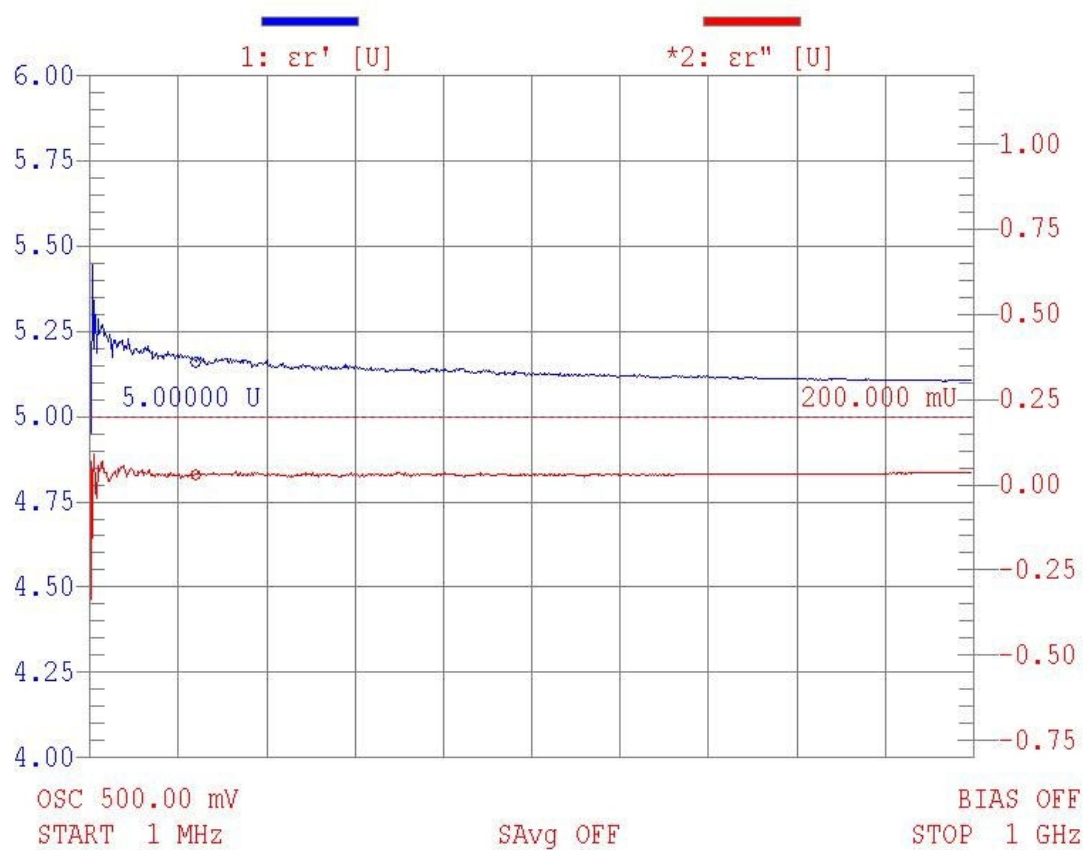
Obr. 4.2. Vysokofrekvenční charakteristika vzorku 2BASAL 1



Obr. 4.3. Vysokofrekvenční charakteristika vzorku 2BASAL 4



Obr. 4.4. Vysokofrekvenční charakteristika vzorku 2GLASS 1



Obr. 4.5. Vysokofrekvenční charakteristika vzorku 2GLASS 2

₂BASAL1				
f [MHz]	ϵ' [-]	ϵ'' [-]	$\tan \delta$ [-]	δ [°]
1-200	6,188	0,067	0,0109	0,625
200-400	6,120	0,083	0,0136	0,780
400-600	6,070	0,102	0,0168	0,963
600-800	6,024	0,114	0,0189	1,082
800-1000	5,979	0,120	0,0201	1,152
₂BASAL4				
1-200	5,687	0,054	0,0095	0,547
200-400	5,628	0,045	0,0080	0,461
400-600	5,603	0,045	0,0081	0,464
600-800	5,584	0,047	0,0084	0,484
800-1000	5,563	0,051	0,0092	0,528
₂E-GLASS1				
1-200	5,408	0,042	0,0080	0,460
200-400	5,362	0,035	0,0065	0,371
400-600	5,329	0,033	0,0062	0,357
600-800	5,295	0,033	0,0062	0,357
800-1000	5,257	0,033	0,0063	0,361
₂E-GLASS2				
1-200	5,182	0,033	0,0063	0,360
200-400	5,142	0,029	0,0057	0,326
400-600	5,126	0,029	0,0057	0,329
600-800	5,116	0,031	0,0060	0,345
800-1000	5,108	0,034	0,0067	0,382

Tab. 4.15. Vysokofrekvenční vlastnosti

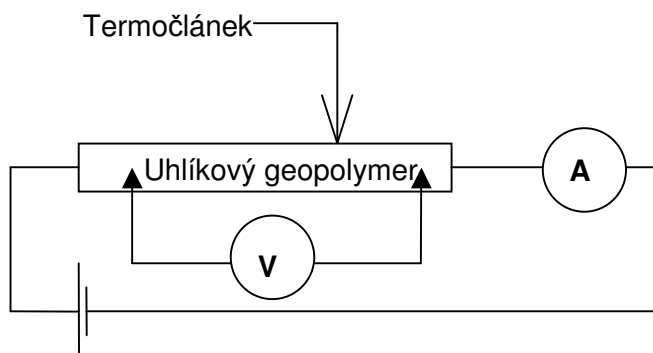
Závěr:

Vzhledem ke ztrátovému úhlu, který je poměrně malý, lze usuzovat, že materiály nebudou vhodné jako dielektrikum vysokofrekvenčního kondenzátoru (dobré kondenzátory mají úhel blízký 90°). Další nevýhoda je velká závislost na frekvenci obou složek permitivity.

4.4. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru stejnosměrným proudem

Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru bylo provedeno pomocí zdroje napětí SHENZHEN MASTECH HY3005D-3, dále pak měřících přístrojů HEXAGON 720 s termočlánkem na měření teploty a dvou DIGITAL MULTIMETER, které měřily proud a napětí.

Měřil jsem čtyřbodovou metodou z důvodu odstranění chyby napětí, která by se mohla objevit díky přechodovému odporu z elektrod na uhlíkový materiál (obr. 4.6.)



Obr. 4.6. Schéma zapojení čtyřbodovou metodou

Měření bylo provedeno celkem 5x. První vzorky ($_1C1$, $_1C2$ uvedeno v příloze) jsem měřil 2x a zatěžoval je proudem podstatně více než vzorek další. Jednalo se o teploty přesahující 300°C , které výrazně změnily strukturu materiálu (došlo i k zapálení vzorku) a následné nové měření potvrdilo změnu vlastností materiálu, jelikož byly naměřeny jiné hodnoty a průběhy. U takto teplotně namáhaného vzorku se projevila i barevná změna z tmavě černé na šedou.

U nového vzorku $_2C5$ (měřeno na délce $l=9\text{cm}$) jsem nepřekročil teplotu 130°C a postupoval velice opatrně. Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 4.16. Z odporu a teploty jsem vypočítal teplotní koeficient α a jeho průměrnou hodnotu jsem použil při znázornění teoretického průběhu v grafu závislosti odporu na teplotě. Postupným zvyšováním proudu rostla i teplota vzorku a snižoval se odpor. Všechny tyto veličiny jsou uvedeny v tabulce.

$$R_x = R_t (1 + \alpha(t_x - t)) \quad (4.12)$$

$$\alpha = \left(\frac{\frac{R_x}{R_t} - 1}{t_x - t} \right) \quad (4.13)$$

R_x je hodnota odporu při teplotě (t_x) vyšší než t (vztažná teplota),

R_t je pak vztažný odpor, α teplotní koeficient.

Průměrná teoretická hodnota teplotního součinitele je pak podle 4.13:

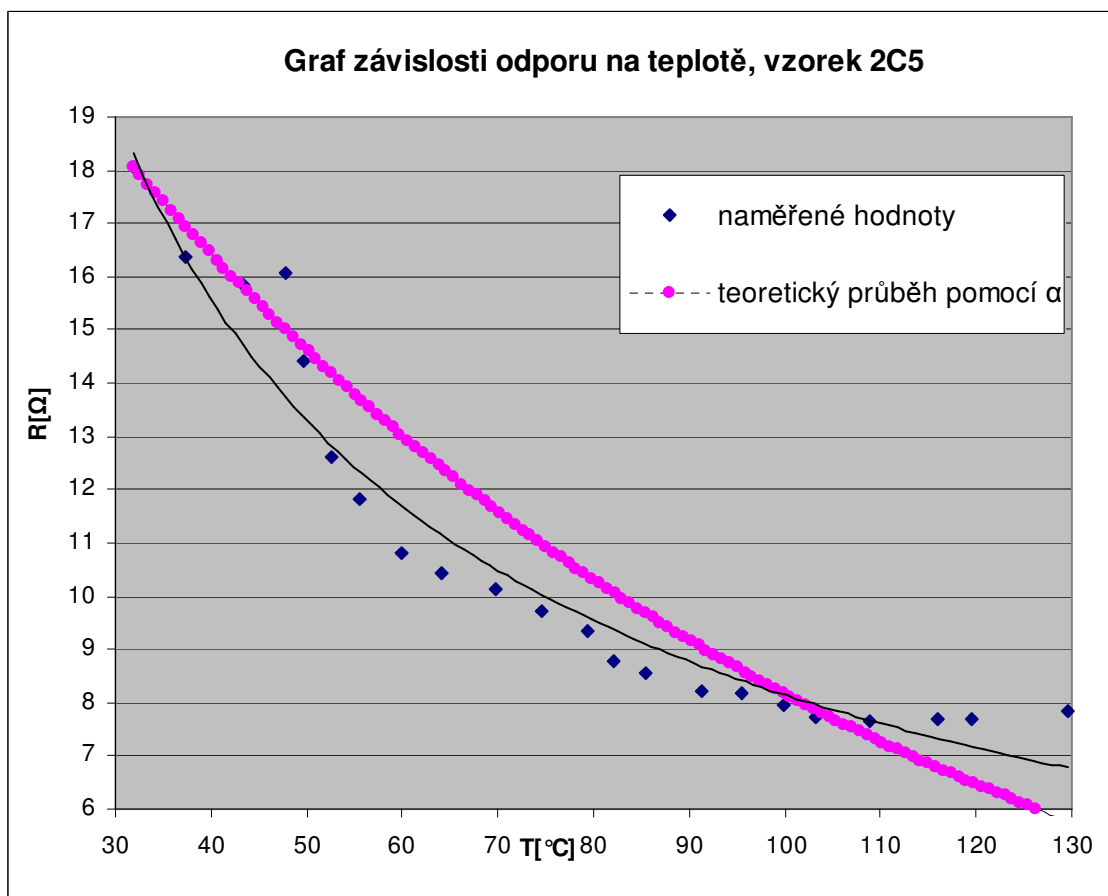
$$\alpha = -0,0116^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

Teoretická hodnota rezistivity spočtená z α a z (4.3), při pokojové teplotě ($t = 23^{\circ}\text{C}$):

$$R_0 = 5,3 [\Omega\text{mm}]$$

T[°C]	U[V]	I[A]	R[Ω]	P[W]
31,8	7,2	0,4	18,1	2,9
37,4	8,2	0,5	16,4	4,1
43,3	9,5	0,6	15,8	5,7
47,8	11,2	0,7	16,1	7,9
49,7	11,5	0,8	14,4	9,2
52,6	11,4	0,9	12,6	10,2
55,6	11,8	1,0	11,8	11,8
60,0	11,9	1,1	10,8	13,1
64,2	12,5	1,2	10,4	15,0
69,8	13,2	1,3	10,1	17,1
74,6	13,6	1,4	9,7	19,1
79,4	14,0	1,5	9,3	21,0
82,1	14,1	1,6	8,8	22,5
85,4	14,5	1,7	8,6	24,7
91,3	14,8	1,8	8,2	26,6
95,4	15,5	1,9	8,2	29,5
99,8	15,9	2,0	8,0	31,8
103,2	16,2	2,1	7,7	34,1
108,8	16,8	2,2	7,6	37,0
116,0	17,7	2,3	7,7	40,7
119,6	18,5	2,4	7,7	44,4
129,6	19,6	2,5	7,9	49,1

Tab. 4.16. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru,
první zkouška, vzorek $_2\text{C5}$.



Závěr:

Je zajímavé, že uhlíkový geopolymér má koeficient α záporný, tudíž s rostoucí teplotou klesá odpor, což není tak obvyklé. Tento jev si vysvětlují tak, že při vyšší teplotě se v matici vzorku uvolňují ionty OH^- , které způsobují lepší vodivost a tím pádem nižší rezistivitu.

5. Shrnutí naměřených konstant, chyby

V následující tabulce je přehled elektrických parametrů, který shrnuje výsledky předchozích kapitol. Všechny elektrické přístroje měly přesnost pod 1%. Chyby způsobené metodou měření nebudou větší jak 10% (tato chyba je způsobena rozptylovými poli zejména při vyšších frekvencích), ale průměrováním hodnot jsem se snažil chyby potlačit. Další chyby mohly vzniknout geometrickou nestejností vzorku. Pro získání přesných parametrů geopolyméru bude nutné všechna měření opakovat při stabilních laboratorních podmínkách (teplota, vlhkost).

Konstanta	Naměřená při	Rozsahy	E-GLASS	BASAL	CARBON
rezistivita Ro [kΩm]	stejnoseměrný proud, napětí	10V-1kV	23-665	360-13410	
	střídavé napětí, f [kHz]	0,1	11,4-17,8	94-151	
		1	4,5-6,2	25-40	
		10	2-2,4	6-9	
		100	0,75-0,76	1,2-1,4	
relativní permitivita εr [-]	střídavé napětí 1V, f [kHz]	0,1	12,4-16,9	7,3-8,1	45-50
	vysokofrekvenční, f [MHz]	1	6,2-7,4	6,4-6,6	41-47
		10	4,5-5	6	38-44
		100	4,1-4,7	5,8-5,9	36-42
		1-200	5,2-5,4	5,7-6,2	
		400-600	5,1-5,3	5,6-6,1	
		800-1000	5,1-5,2	5,6-6	
Činitel ztráty tan δ [-]	střídavé napětí 1V, f [kHz]	0,1	0,81-0,98	0,16-0,24	
	vysokofrekvenční, f [MHz]	1	0,46-0,56	0,07-0,10	
		10	0,17-0,19	0,04-0,05	
		100	0,05-0,06	0,02-0,03	
		1-200	0,0080-0,0063	0,0095-0,0109	
		400-600	0,0057-0,0062	0,0081-0,0168	
		800-1000	0,0063-0,0067	0,0092-0,0201	
Ztrátový úhel δ[°]	střídavé napětí 1V, f [kHz]	0,1	39-44	9,3-13,2	
	vysokofrekvenční, f [MHz]	1	25-30	4-6,2	
		10	9,6-10,9	2-3	
		100	3,1-3,3	1,2-1,5	
		1-200	0,36-0,46	0,55-0,63	
		400-600	0,33-0,36	0,46-0,96	
		800-1000	0,36-0,38	0,53-1,15	

Tabulka 5.1 souhrnný přehled materiálových konstant geopolymérů.

6. Závěr

Základem geopolymérů ze skleněných a čedičových vláken jsou velmi kvalitní izolanty, které se běžně používají v elektrotechnice. Při výsledném technologickém zracování se však ukazuje, že:

- Elektrické vlastnosti ovlivňuje především typ pojiva (matrice) a jeho homogenita. Příkladem může být zatížení geopolyméru vysokým napětím. Pravděpodobně dochází k vypálení nečistot uvnitř struktury a provedeme-li cyklické namáhání, ustálí se hodnota na určitém měrném odporu a dále nestoupá. Platí to ale pro konstantní podmínky (teplota, vlhkost, atmosférický tlak).
- Největším problémem (omezením) uplatnění geopolymérů v elektrotechnice je poréznost a s tím související nasákavost. Tato nepříznivá vlastnost má přímý vliv na většinu elektrických materiálových konstant. Zvyšuje makroskopickou měrnou vodivost, snižuje měrný odpor, elektrickou pevnost a činitel ztrát (vysokofrekvenční). Ztrátový činitel a nízká dielektrická konstanta naznačují, že čedičové a skelné geopolymery budou mírně tlumit vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Lze také předpokládat, že to bude podobné u ostatních materiálů používaných ve stavebnictví. Uhlíkový geopolimer by mohl i v některých speciálních aplikacích sehrát roli stínění jako náhrada neferomagnetických stínících krytů.

Vysokonapěťová měření by bylo dobré v budoucnu opakovat s výkonnějším zdrojem VN tak, aby došlo k průrazu a vzorky pak podrobit mikroskopické analýze. Potřebné vybavení má ČVUT v Praze, fakulta elektrotechnická.

Z hlediska elektrických parametrů se ukazuje, že nejméně stabilní součástí geopolymérů jsou pojiva, proto by bylo dobré v budoucnu změřit jejich elektrické vlastnosti odděleně.

Pro lepší přesnost měření by bylo vhodné použít rtuťové elektrody, které by lépe přilnuly k vzorku a zároveň se nenasákly do struktury. Před každým měřením by také bylo dobré vysušit vzorky na konstantní vlhkost nebo je rovnou po výrobě nechat povlakovat. Pro precizní měření bude třeba dodržet přesné geometrické rozměry a pro každou metodu bude nutné vyrobit speciální tvar vzorku.

Ve své práci jsem použil vzorky vyrobené v laboratorních podmínkách a pro dané měření jsem nepoužil všechny obdržené vzorky, z každého typu geopolyméru jen několik. Práce tedy není schopna posoudit vliv změn technologie výroby na elektrické parametry vzorků.

7. Literatura

- [1] HAASZ, V., SEDLÁČEK, M.: *Elektrická měření (Přístroje a metody)*.
ČVUT, Praha, 2003.
- [2] HAŇKA, L.: *Teorie elektromagnetického pole*. SNTL, Praha, 1975.
- [3] DAVIDOVITS, J.: *Geopolymer Chemistry and Properties - Geopolymer '88, Vol. 1*
- [4] KONG, L.Y., Sanjayan, J.G.: Comparative performance of geopolymers made with
metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures - *Cement
and Concrete Research* 37 (2007), pp. 1583–1589.
- [5] URL <<http://ddfiberglass.com/fiberglass-background-and-manufacture.html>>
- [6] DAĐOUREK, K.: *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*, TU v Liberci, 2007
- [7] HASSENTEUFEL, J., DUBSKÝ J., RAPOŠ, M., ŠANDERA, J.: *Elektrotechnické
materiály*. SNTL, Bratislava 1971
- [8] URL <[http://uk.rs-online.com/web/search/searchBrowseAction.html?
method=getProduct&R=1863600#header](http://uk.rs-online.com/web/search/searchBrowseAction.html?method=getProduct&R=1863600#header)>
- [9] ĎAĐO, S., KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*. ČVUT, Praha, 1999.
- [10] RICHTER, A., Rydlo P.: *Hystereze dielektrických materiálů a její praktický význam*,
učební texty TUL, FM, 2003

8. Přílohy

Zde jsou všechny tabulky a grafy měření vzorků ze série 1.

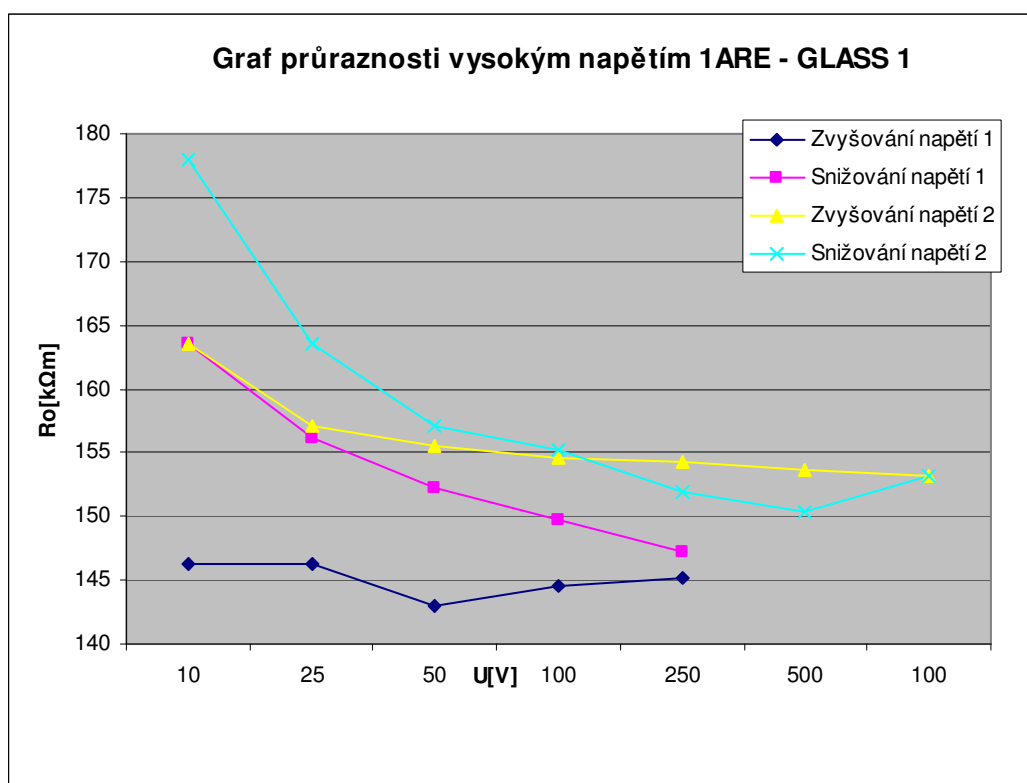
8.1 Měření stejnosměrného odporu a elektrické pevnosti (kapitola 4.1)

U [V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	0,456	0,51	0,51	0,555
25	0,456	0,487	0,49	0,51
50	0,446	0,475	0,485	0,49
100	0,451	0,467	0,482	0,484
250	0,453	0,459	0,481	0,474
500	PRŮRAZ		0,479	0,469
1000			0,478	0,478

Tab. 8.1. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů
při vysokém napětí (1ARE- GLASS 1 vzdálenost elektrod d=6,6 cm)

U [V]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]
10	146	164	164	178
25	146	156	157	164
50	143	152	155	157
100	145	150	155	155
250	145	147	154	152
500	PRŮRAZ		154	150
1000			153	153

Tab. 8.2. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém
napětí (1ARE- GLASS 1 vzdálenost elektrod d=6,6 cm)

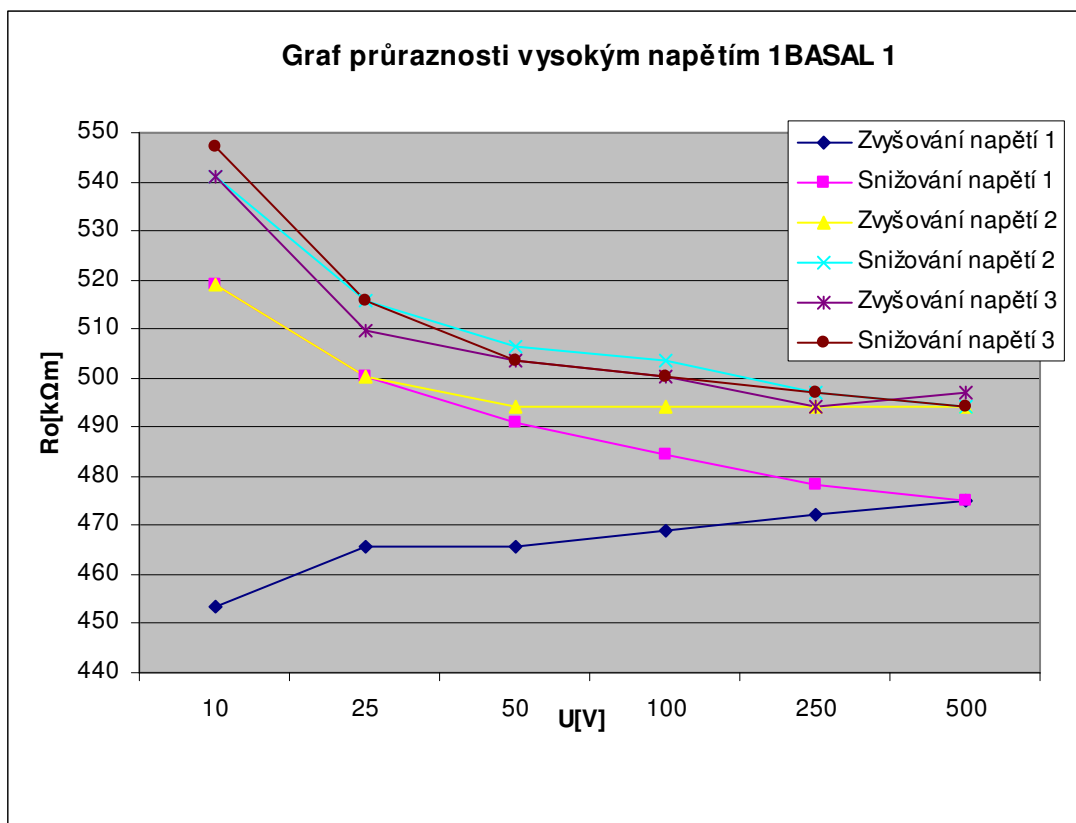


U[V]	R[GΩ]	R[GΩ]	R[GΩ]	R[GΩ]	R[GΩ]	R[GΩ]
10	1,45	1,66	1,66	1,73	1,73	1,75
25	1,49	1,60	1,60	1,65	1,63	1,65
50	1,49	1,57	1,58	1,62	1,61	1,61
100	1,50	1,55	1,58	1,61	1,60	1,60
250	1,51	1,53	1,58	1,59	1,58	1,59
500	1,52	1,52	1,58	1,58	1,59	1,58
1000	PRŮRAZ		PRŮRAZ		PRŮRAZ	

Tab. 8.3. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů
při vysokém napětí (1BASAL 1 vzdálenost elektrod d=6,9 cm)

U[V]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]	R _o [kΩm]
10	453	519	519	541	541	547
25	466	500	500	516	510	516
50	466	491	494	506	503	503
100	469	485	494	503	500	500
250	472	478	494	497	494	497
500	475	475	494	494	497	494
1000	PRŮRAZ		PRŮRAZ		PRŮRAZ	

Tab. 8.4. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém
napětí (1BASAL 1 vzdálenost elektrod d=6,9 cm)

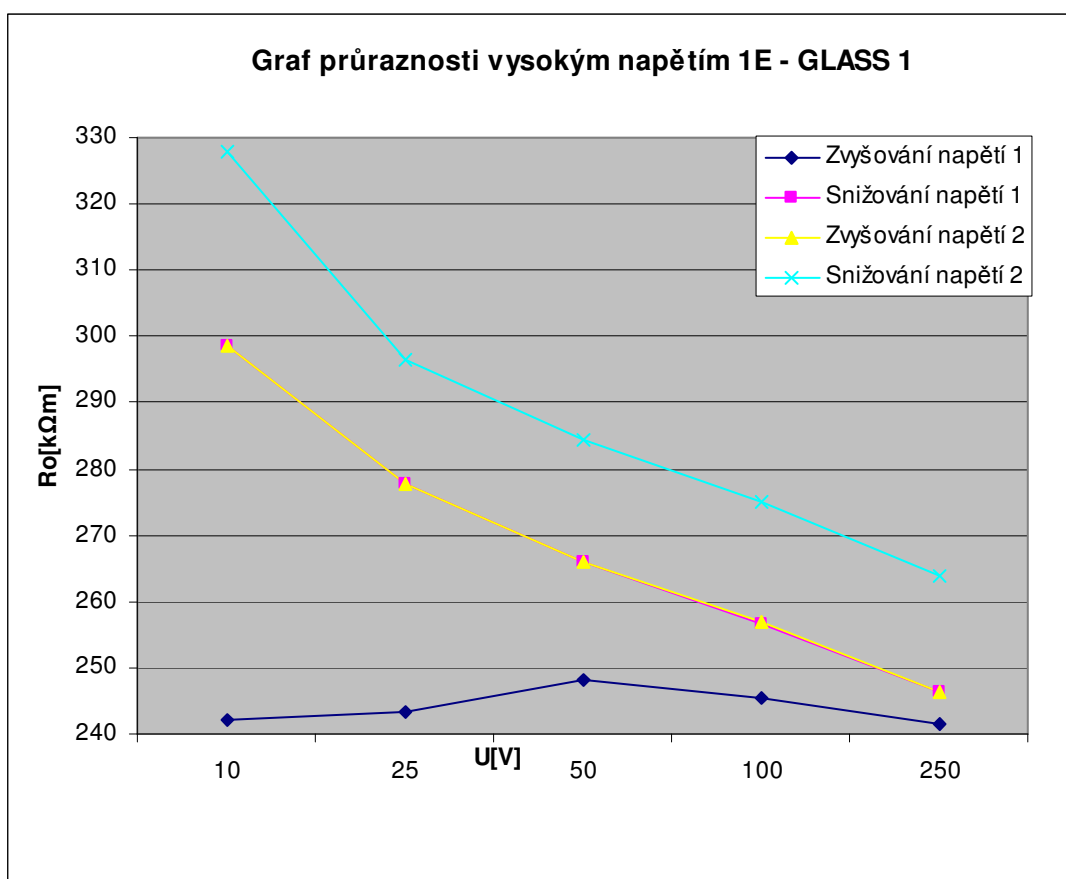


U[V]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]	R [GΩ]
10	0,736	0,908	0,908	0,997
25	0,740	0,844	0,844	0,901
50	0,754	0,808	0,808	0,864
100	0,746	0,780	0,781	0,836
250	0,734	0,749	0,749	0,802
500	PRŮRAZ		PRŮRAZ	

Tab. 8.5. Naměřené hodnoty stejnosměrných odporů
při vysokém napětí (1E-GLASS 1 vzdálenost elektrod d=6,8 cm)

U[V]	R_o [kΩm]	R_o [kΩm]	R_o [kΩm]	R_o [kΩm]
10	242	299	299	328
25	243	278	278	296
50	248	266	266	284
100	245	257	257	275
250	241	246	246	264
500	PRŮRAZ		PRŮRAZ	

Tab. 8.6. Vypočtené hodnoty rezistivity při vysokém
napětí (1E-GLASS 1 vzdálenost elektrod d=6,8 cm)



8.2 Nízkofrekvenční měření od 100Hz do 100kHz (kapitola 4.2)

C_p [pF]	R_p [MΩ]	f [kHz]	R_0 [mΩ]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
45	1,3	0,1	82,21	7,12E-10	80	27,220	87,9
23	1,1	1	69,56	3,64E-10	41	6,294	81,0
17	0,77	10	48,69	2,69E-10	30	1,216	50,6
11	0,36	100	22,77	1,74E-10	20	0,402	21,9

Tab. 8.7. Nízkofrekvenční charakteristika γ ARE-GLASS 2

C_p [pF]	R_p [MΩ]	f [kHz]	R_0 [mΩ]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
60	0,21	0,1	14,16	8,90E-10	101	126,378	89,6
56	0,213	1	14,36	8,30E-10	94	13,350	85,8
28	0,198	10	13,35	4,15E-10	47	2,872	70,8
16	0,117	100	7,89	2,37E-10	27	0,851	40,4

Tab. 8.8. Nízkofrekvenční charakteristika γ E - GLASS 2

C_p [pF]	R_p [M Ω]	f [kHz]	R_0 [m Ω]	ε [F/m]	ε_r [-]	$\tan \delta$	δ [°]
50	1,1	0,1	77,05	7,14E-10	81	28,952	88,1
28	1	1	70,05	4,00E-10	45	5,687	80,1
16	0,721	10	50,50	2,28E-10	26	1,380	54,1
11	0,37	100	25,92	1,57E-10	18	0,391	21,4

Tab. 8.9. Nízkofrekvenční charakteristika γ BASAL2

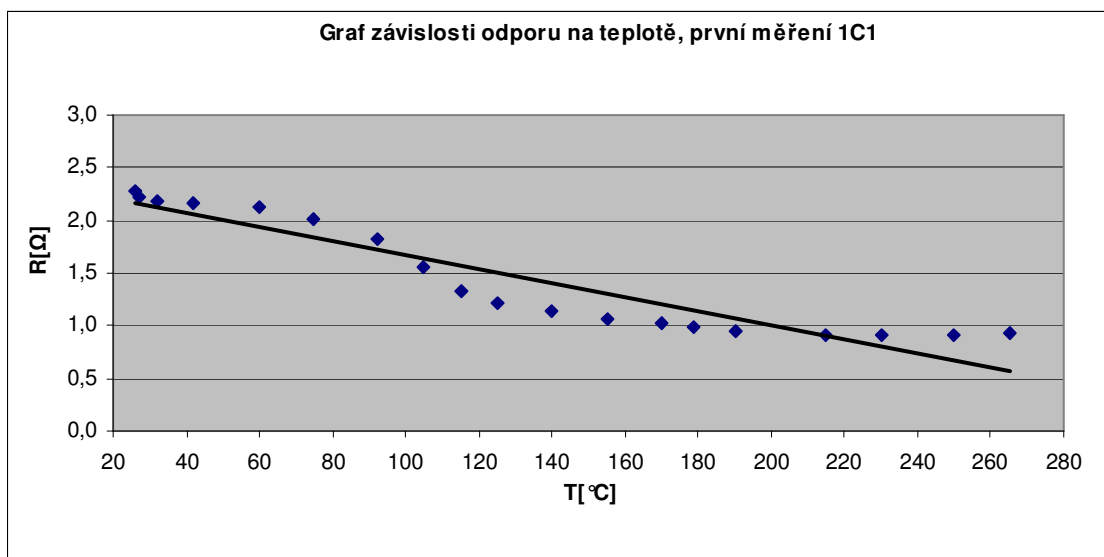
8.3 Měření na vysokofrekvenčním materiálovém analyzátoru (kapitola 4.3)

Vzhledem k velkému množství dat (řádově tisíce) jsou naměřené hodnoty uloženy v elektronické podobě v souboru excel na CD.

8.4 Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru stejnosměrným proudem (kapitola 4.4)

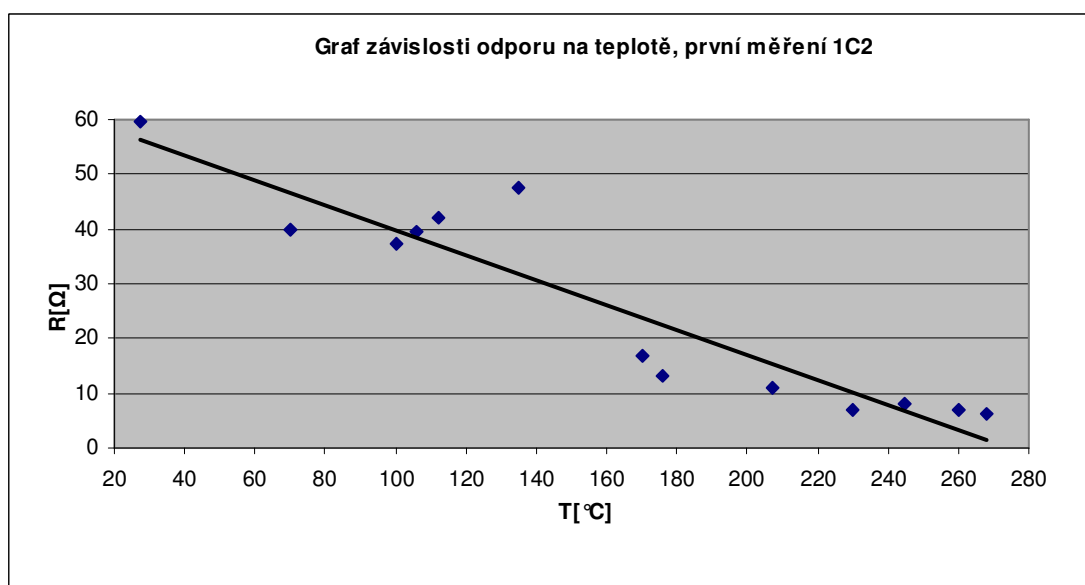
T [°C]	U [V]	I [A]	R [Ω]	P [W]
26	0,59	0,3	2,27	0,15
27	1,14	0,5	2,23	0,58
32	2,21	1,0	2,19	2,24
42	3,25	1,5	2,17	4,88
60	4,26	2,0	2,13	8,52
75	5,05	2,5	2,02	12,63
92	5,46	3,0	1,82	16,38
105	5,45	3,5	1,56	19,08
115	5,35	4,0	1,34	21,40
125	5,50	4,5	1,22	24,75
140	5,68	5,0	1,14	28,40
155	5,90	5,5	1,07	32,45
170	6,16	6,0	1,03	36,96
179	6,36	6,5	0,98	41,34
190	6,60	7,0	0,94	46,20
215	6,90	7,5	0,92	51,75
230	7,28	8,0	0,91	58,24
250	7,71	8,5	0,91	65,54
265	8,30	9,0	0,92	74,70

Tab. 8.10. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru, první zkouška, vzorek γ C1



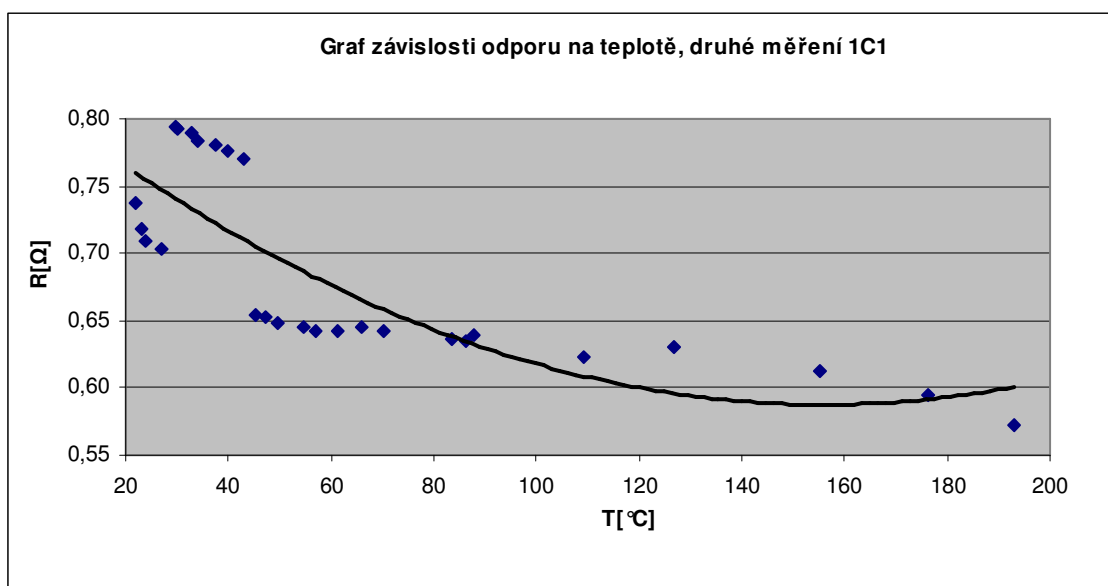
T [$^{\circ}\text{C}$]	U [V]	I [A]	R [Ω]	P [W]
28	7,15	0,1	59,58	0,86
70	20,00	0,5	40,00	10,00
100	25,00	0,7	37,31	16,75
106	28,00	0,7	39,44	19,88
112	31,00	0,7	41,89	22,94
135	39,00	0,8	47,56	31,98
170	26,00	1,6	16,77	40,30
176	20,00	1,5	13,07	30,60
207	22,00	2,0	10,89	44,44
230	18,00	2,5	7,11	45,54
245	22,00	2,8	8,00	60,50
260	21,00	3,0	7,05	62,58
268	18,00	3,0	6,04	53,64

Tab. 8.11. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru, , vzorek 1C2



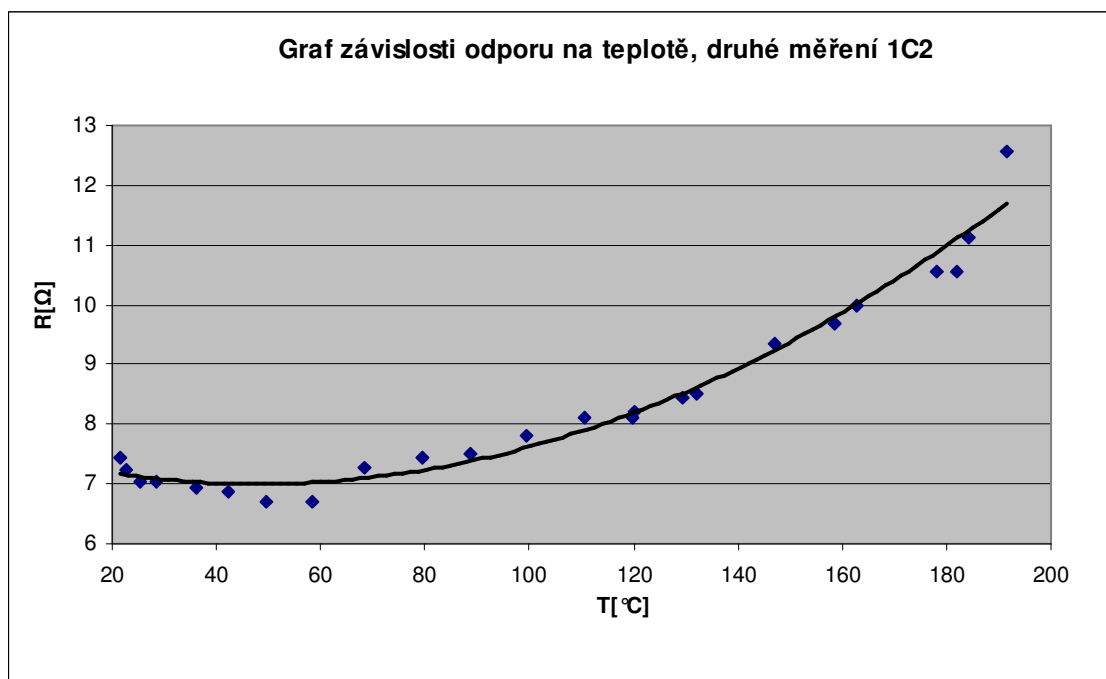
T[°C]	U[V]	I[A]	R[Ω]	P[W]
22	0,16	0,2	0,74	0,03
23	0,36	0,5	0,72	0,18
24	0,57	0,8	0,71	0,45
27	0,56	0,8	0,70	0,45
30	0,64	0,8	0,79	0,51
30	0,63	0,8	0,79	0,51
33	0,71	0,9	0,79	0,64
34	0,78	1,0	0,78	0,78
37	0,86	1,1	0,78	0,94
40	0,93	1,2	0,78	1,12
43	1,00	1,3	0,77	1,30
45	0,92	1,4	0,65	1,28
47	0,98	1,5	0,65	1,47
50	1,04	1,6	0,65	1,66
55	1,10	1,7	0,65	1,86
57	1,16	1,8	0,64	2,08
61	1,22	1,9	0,64	2,32
66	1,29	2,0	0,65	2,58
70	1,35	2,1	0,64	2,83
84	1,59	2,5	0,64	3,98
86	1,59	2,5	0,64	3,97
88	1,60	2,5	0,64	3,99
109	1,87	3,0	0,62	5,61
127	2,21	3,5	0,63	7,72
155	2,45	4,0	0,61	9,80
176	2,68	4,5	0,60	12,05
193	2,86	5,0	0,57	14,32

Tab. 8.12. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru,
druhá zkouška, vzorek 1C1



T[°C]	U[V]	I[A]	R[Ω]	P[W]
21	0,74	0,1	7,43	0,07
23	1,45	0,2	7,26	0,29
25	2,18	0,3	7,04	0,68
29	2,81	0,4	7,03	1,12
36	3,47	0,5	6,94	1,74
42	4,13	0,6	6,88	2,48
50	4,70	0,7	6,71	3,29
58	5,37	0,8	6,71	4,30
68	6,55	0,9	7,28	5,90
79	7,45	1,0	7,45	7,45
89	8,26	1,1	7,51	9,09
100	9,37	1,2	7,81	11,24
111	10,54	1,3	8,11	13,70
120	11,35	1,4	8,11	15,89
120	11,50	1,4	8,21	16,10
129	12,69	1,5	8,46	19,04
132	12,78	1,5	8,52	19,17
147	14,98	1,6	9,36	23,97
159	16,49	1,7	9,70	28,03
163	17,00	1,7	10,00	28,90
178	18,98	1,8	10,54	34,16
182	19,00	1,8	10,56	34,20
184	20,00	1,8	11,11	36,00
191	22,60	1,8	12,56	40,68

Tab. 8.13. Teplotní namáhání uhlíkového geopolyméru,
druhá zkouška, vzorek 1C2



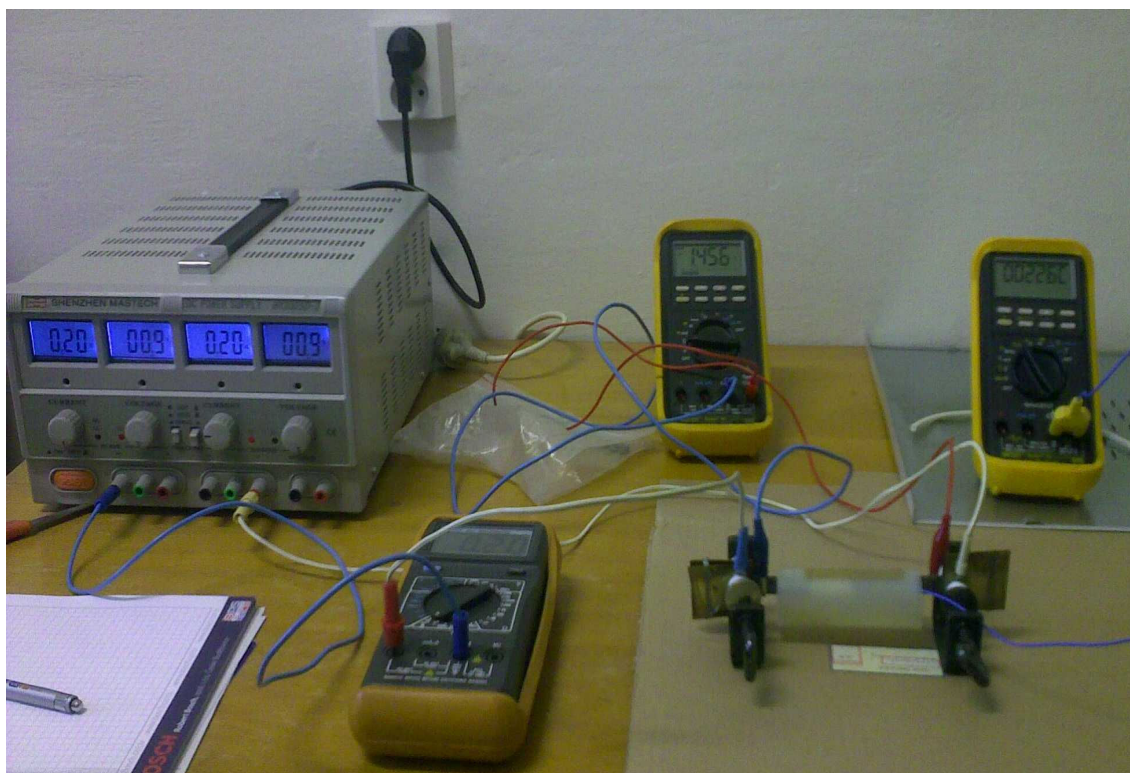
8.5 Fotodokumentace



Obr. 8.1. Vzorky série 1 pokovené stříbrnou pasou (zleva: C1, C2, ₁BASAL1, ₁BASAL2, ₁E – GLASS1, ₁E – GLASS2, ₁ARE- GLASS1, ₁ARE- GLASS2)



Obr. 8.2. Vzorky série 1 a 2 (zleva: ₁C1, ₁C2, ₂E – GLASS 3, ₂E – GLASS 1, ₂BASAL 3, ₂BASAL5, ₂C3, ₂C4,)



Obr 8.3. Uspořádání pracoviště při měření teplotního namáhání uhlíkového geopolyméru



Obr 8.4. Vysokofrekvenční materiálový analyzátor (Agilent E4991A RF Material Analyzer)



Obr 8.5. Hexagon 720 použitý na měření teploty



Obr 8.6. Digital multimeter použitý
na měření napětí a proudu



Obr 8.7. TH 2821 LCR METER



Obr 8.8. HP 4263B LCR METER



Obr 8.9. zdroj SCHENZEN MASTECH
HY 3005D-3



Obr 8.10. HP 4339B DIGITAL HIGH
RESISTANCE METER